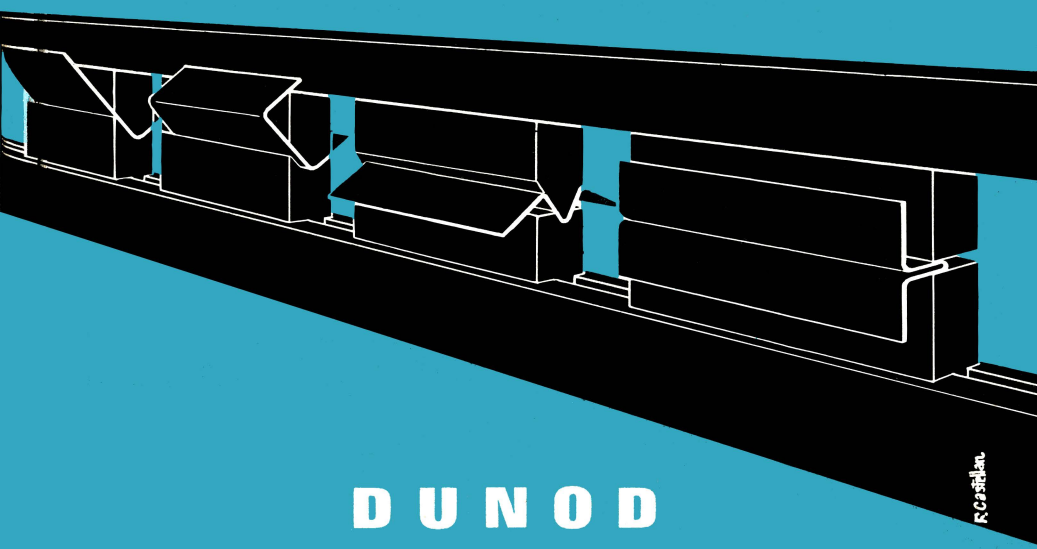
Lycées techniques
Collèges d'enseignement technique

# technologie professionnelle du travail des métaux en feuilles tubes, profilés

G. COTANT



DUNOD

DU MÊME AUTEUR

Chez **DUNOD**, Éditeur

---

**Traçage des métaux en feuilles.**

*Lycées techniques, collèges d'enseignement technique, cours professionnels préparation aux C. A. P. et B. P.*

# TECHNOLOGIE PROFESSIONNELLE

## DU TRAVAIL DES

# MÉTAUX EN FEUILLES

## TUBES, PROFILÉS

PAR

G. COTANT

Professeur honoraire
de l'Enseignement technique

SIXIÈME ÉDITION

**Lycées techniques**
**Collèges**
**d'Enseignenent technique**
**Promotion sociale**
**Cours professionnels**

DUNOD
PARIS
1971

© 1971 Dunod

"Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants-droit, ou ayants-cause, est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal. La loi du 11 mars 1957 n'autorise, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, que les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective d'une part, et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration".

# AVANT-PROPOS

Si l'on s'en rapporte au dictionnaire, la chaudronnerie est l'art de faire des chaudrons. Cette définition était exacte au temps où nos anciens travaillaient uniquement, ou presque, pour l'industrie alimentaire, et fabriquaient surtout des récipients pour conserver, préparer et servir les aliments : chaudrons, ustensiles de cuisine, etc., en cuivre et même en or et en argent pour la vaisselle.

Favorisée par l'apparition des métaux et alliages nouveaux, ainsi que par la mise au point des méthodes modernes de fabrication, l'industrie a connu, en un siècle, un essor prodigieux qui a bouleversé toutes les techniques, et en particulier celles de la chaudronnerie. Pour répondre aux exigences chaque jour plus nombreuses et plus diverses des industries nouvelles, ce vieux métier s'est transformé en un ensemble de spécialités que l'on désigne plus exactement par « le travail des métaux en feuilles », auquel il convient d'ajouter le travail des tubes et des profilés.

Il semble bien qu'à l'heure actuelle on s'oriente de plus en plus, dans bien des domaines, vers les fabrications obtenues à partir de tôles minces pliées ou embouties, de tubes et de profilés, le tout assemblé par soudage. Cette technique permet d'obtenir ainsi des ensembles dans lesquels sont heureusement associées une résistance et une légèreté remarquables, et dont les cellules d'avions et les carrosseries automobiles sont des exemples typiques.

Mais à son appellation ancienne s'attache toujours un sens quelque peu péjoratif et, par rapport à certains métiers voisins, la chaudronnerie ne jouit pas de toute l'estime qu'elle mérite. Personne ne conteste l'intérêt que présentent les professions de la mécanique avec leurs machines-outils remarquables, leurs appareils de contrôle de haute précision — de l'ordre du micron — celle du modeleur avec ses études de modèles, celle de l'électricien, avec l'électronique et ses montages qui s'entourent de mystère — ne dit-on pas la fée électricité ? Mais

lorsqu'on parle de la chaudronnerie on évoque un métier malpropre et bruyant — représenté par le fumiste ou le rétameur — n'exigeant que des bras vigoureux pour manier un lourd marteau et des tympans solides capables de résister à un bruit assourdissant.

Et pourtant ce jugement est loin d'être justifié. Il suffit pour s'en convaincre d'avoir l'occasion de visiter les ateliers où l'on fabrique, à partir de feuilles de tôle, la carrosserie d'une voiture automobile, la coque et les structures d'un grand navire, les récipients et réservoirs divers utilisés par les industries chimiques et alimentaires, par les industries de traitement des produits pétroliers, par les conduites et appareillages des centrales hydrauliques et thermiques, des installations de ventilation, de chauffage, des industries nucléaires, etc.

En raison même de la diversité extrême et de la complexité des fabrications — tant en nature qu'en formes et en dimensions — le travail des métaux en feuilles ne manque ni d'attrait, ni d'intérêt, mais il exige en même temps des connaissances étendues dans des domaines très variés.

Nous ne sommes plus au temps où la chaudronnerie se faisait uniquement au marteau. Il faut, avant toute chose, savoir faire les épures des surfaces à exécuter, déterminer leurs intersections, leurs développements, ce qui exige des bases solides en géométrie, en lecture de dessin et surtout en géométrie descriptive. Souvent pour les surfaces non développables, il est nécessaire de calculer les surfaces équivalentes, d'appliquer le théorème de Guldin, de rechercher la position d'un centre de gravité, etc.

La mise en forme à la main, toujours difficile et coûteuse, est en nette régression devant le travail mécanique qui tend, dans le compartiment fabrication, à éliminer les ouvriers qualifiés pour les remplacer par des manœuvres. Mais les problèmes très particuliers de l'emboutissage, résolus souvent empiriquement, faute de bases vraiment scientifiques, ne peuvent être traités convenablement que par des spécialistes connaissant parfaitement le mécanisme du déplacement de métal, dans la mise en forme sans modification de l'épaisseur.

Les diverses méthodes de soudage, qui semblent si simples et si pratiques à utiliser, réservent bien des surprises à ceux qui ne les ont pas étudiées sérieusement. Pour les mettre en pratique, sans déboires, il est indispensable de connaître parfaitement les propriétés et les caractéristiques des métaux et alliages, chaque jour plus nombreux, pour apprécier leur « soudabilité », c'est-à-dire leur aptitude à donner des joints soudés de qualité. Pour cela, il faut savoir choisir les techni-

ques et les traitements appropriés, afin d'obtenir des soudures d'une parfaite tenue mécanique et chimique, tout en évitant les néfastes effets du chauffage localisé dans la soudure : les déformations, les dangereuses tensions internes, et même les cassures.

Ce résultat ne peut être atteint que si l'on sait exécuter les différents essais et contrôles, et surtout interpréter leurs résultats : essais de dureté, de résilience, etc., contrôles radiographique et gammagraphique, contrôles par ultra-sons, etc.

Enfin, dans un autre ordre d'idées, il est intéressant de noter que les débouchés ne manquent pas au chaudronnier. En raison de la diversité de ses méthodes et de ses procédés de fabrication, d'une part, et des métaux et alliages travaillés d'autre part, il lui est possible de s'adapter facilement et rapidement à des spécialités très variées.

Après les importants remaniements des 4e et 5e éditions, la présente édition a été l'objet de quelques modifications en vue de sa mise à jour, notamment en ce qui concerne les propriétés, les essais, les traitements, et surtout la soudabilité des métaux et alliages. Quelques compléments ont été également apportés, d'une part, aux chapitres traitant des déformations et des tensions dans les pièces soudées, et d'autre part, dans les assemblages des tubes.

Malgré ces additions et améliorations, le présent ouvrage ne peut pas avoir la prétention d'être complet ; l'ampleur du sujet traité ne permet souvent que d'exposer le principe de chaque opération et les croquis ne sont, dans la plupart des cas, que des schémas.

Dans le cadre de son importance, ce cours se propose, d'une part, d'apporter le maximum de documentation à l'apprenti, à l'ouvrier, au technicien et à tous ceux qui, de près ou de loin, s'intéressent au travail des métaux en feuilles et, d'autre part, d'essayer de faire mieux connaître l'intérêt et les possibilités de l'une de nos plus belles professions.

# TABLE DES MATIÈRES


Pages

NOUVELLES UNITÉS DE MESURE . . . . . XVII

SYMBOLES UTILISÉS DANS L'OUVRAGE . . . . . XVIII

*Chapitre premier*

## GÉNÉRALITÉS

*Les métiers de la chaudronnerie* . . . . . 1

*Les difficultés du travail des métaux en feuilles* . 2

MATIÈRES PREMIÈRES UTILISÉES PAR LE CHAUDRONNIER . . . . . 3

*Élaboration* . . . . . 3

Fabrication des tôles d'acier . . . . . 3

Métaux et alliages non ferreux . . . . 5

*Propriétés* . . . . . 6

*Essais des métaux et alliages* . . . . 7

DIFFÉRENTS MÉTAUX ET ALLIAGES TRAVAILLÉS EN CHAUDRONNERIE . . . . . 13

*Métaux et alliages ferreux* . . . . . 13

Aciers non alliés . . . . . 13

Tôles . . . . . 15

Protection de l'acier . . . . . 18

*Aciers alliés utilisés en chaudronnerie* . . . . . 19

Aciers faiblement alliés . . . . . 19

Aciers fortement alliés . . . . . 21

Aciers plaqués . . . . . 23

*Métaux et alliages non ferreux* . . . . . 23

Cuivre et laitons . . . . . 23

Aluminium et alliages d'aluminium . . . . . 24

Nickel et ses alliages . . . . . 28

Titane et zirconium . . . . . 28

Pages

*Traitements thermiques et mécaniques et décapage des métaux et alliages* . . . . . 29
Écrouissage . . . . . 29
Recuits de recristallisation et de détente. . . . . 30
Préchauffage et postchauffage. . . . . 30
Traitements particuliers et décapage. . . . . 31

*L'atelier et l'outillage général* . . . . . 35
Les magasins . . . . . 35
L'atelier et l'outillage manuel général . . . . . 36
Appareils de levage et de manutention . . . . . 40
Installations accessoires . . . . . 42

*Chapitre II*

## TRAVAIL DES TOLES A PLAT

LE TRAÇAGE . . . . . 43
Outillage courant . . . . . 43
Outillage spécial . . . . . 46

LE DÉCOUPAGE . . . . . 49

*Le cisaillage* . . . . . 49
Principe . . . . . 49
Différents types de cisailles . . . . . 50
Cisailles guillotines. . . . . 52
Cisailles pour découpages sinueux . . . . . 55
Cisailles alternatives . . . . . 56

*Le poinçonnage* . . . . . 59
Principe . . . . . 59
Poinçons et poinçonneuses . . . . . 60

*Le grignotage*. . . . . 61
Poinçons et méthodes de grignotage. . . . . 62

*Le grugeage* . . . . . 64
Unités de poinçonnage . . . . . 65

*Le découpage à la presse*. . . . . 68
Principaux types d'outils de découpage . . . . . 69

*Découpage par enlèvement de copeaux*. . . . . 73
Scies circulaires et à ruban . . . . . 73
Machines spéciales pour les alliages légers . . . . . 73

Pages

*Le perçage* . . . . . 74

Outillage . . . . . 74
Pratique du perçage et montages de perçage . . . . 77

*Le chanfreinage* . . . . . 78

Machines diverses . . . . . 78

*Le meulage* . . . . . 81

Les meules . . . . . 81
Pratique du meulage . . . . . 82

*L'oxy-coupage* . . . . . 83

Principe et outillage . . . . . 83
Méthode de découpage manuel . . . . . 84
Machines à découper . . . . . 85
Oxy-coupage à la poudre . . . . . 89

*Coupage au plasma* . . . . . 89

*Chapitre III*

## LA MISE EN FORME

Surfaces développables . . . . . 91
Surfaces non développables . . . . . 92

MISE EN FORME DES SURFACES DÉVELOPPABLES . 93

*Le dressage des tôles* . . . . . 93

Dressage à la main . . . . . 94
Dressage à la machine :
Au martinet . . . . . 103
A la machine à rouleaux . . . . . 104
Machines à dresser par traction . . . . . 107
Dressage par chaudes de retrait . . . . . 108

*Le cintrage* . . . . . 108

Cintrage à la main . . . . . 110
Cintrage à la machine :
Disposition des rouleaux . . . . . 113
Méthode de cintrage, amorçage ou croquage . . . 113
Cintrage conique . . . . . 115
Cintrage sur plieuse et sur presse-plieuse . . . . 116
Bordage sur presse-plieuse . . . . . 117

Pages

*Le pliage* . . . . . 118

Développé d'une tôle pliée . . . . . 119
Pliage à la main. . . . . 119
Pliage à la machine et différents types de plieuses . . . 121
Cintrage cylindrique sur plieuse. . . . . 126
Cintrage conique sur plieuse. . . . . 127

*Le pliage à la presse-plieuse*. . . . . 127

Principe . . . . . 127
Presses plieuses. . . . . 127
Méthode de pliage . . . . . 129
Pliage et cambrage sur élastomère . . . . . 134

MISE EN FORME DES SURFACES NON DÉVELOPPABLES A LA MAIN . . . . . 136

*Généralités* . . . . . 136

*Étirage ou emboutissage à la main* . . . . . 139

Différentes méthodes d'étirage et d'emboutissage . 140

*La rétreinte à la main* . . . . . 147

Principe . . . . . 147
Outillage. . . . . 150
Rétreinte des tôles minces à froid. . . . . 151
Surfaces non développables composées . . . . . 159
Surfaces non développables formées à partir de cônes et de cylindres . . . . . 163

SIMPLIFICATION DE LA MISE EN FORME PAR LE SOUDAGE . . 165

*Calibrage et contrôle des pièces formées* . . . . . 167

*Le planage* . . . . . 168

Planage à la main. . . . . 168
Planage à la machine. . . . . 168

MISE EN FORME DES SURFACES NON DÉVELOPPABLES A LA MACHINE. . . . . 171

*Machines semi-automatiques* . . . . . 171

Étirage au martinet. . . . . 171
Étirage sur machines à galets presseurs . . . . . 171
Étirage ou rétreinte de petits bords sur machines à cintrer. . . . . 172

Pages

Machine à former à mors mobiles . . . . . 172
Machines à déformation progressive. . . . . 174
Étirage de collets dans un cylindre . . . . . 175
Mise en forme sur machine à galets . . . . . 176

*Repoussage au tour* . . . . . 178

Principe . . . . . 178
Outillage. . . . . 179
Exécution du repoussage . . . . . 181
Applications. . . . . 185

*Machines automatiques. Emboutissage à la presse.* . . . . . 186

Principe . . . . . 186
Presses mécaniques. . . . . 186
Presses hydrauliques . . . . . 195
Calcul des dimensions des flans et des outils . . . . . 197
Différents types d'outils . . . . . 199
Outils travaillant par rétreinte. . . . . 202
Outils de premier emboutissage . . . . . 202
Outils de réétirage . . . . . 204
Pièces de forme hémisphérique pour presse simple effet . . . . . 206
Outil non cylindrique pour presse double effet . . . 208
Mise en forme à l'aide d'explosifs . . . . . 208
Filage à la presse . . . . . 209
Fluotournage . . . . . 210

*Chapitre IV*

## LES PROCÉDÉS D'ASSEMBLAGE

RIVETAGE . . . . . 213

*Rivetage des aciers non alliés* . . . . . 213
Proportions d'une ligne de rivure en fonction de l'épaisseur à river. . . . . 214
Montage. . . . . 215
Outillage . . . . . 216
Pratique du rivetage :

*Rivures spéciales*. . . . . 219
Rivures abreuvées ou « embrévées ». . . . . 219
Rivures affleurées . . . . . 220

Pages

*Rivetage des métaux non ferreux* . . . . . 221
Rivetage du cuivre . . . . . 221
Rivetage des alliages légers . . . . . 221
Vis Parker . . . . . 224

AGRAFAGE . . . . . 225

Agrafage à la main. . . . . 225
Agrafage à la machine. . . . . 226
Applications. . . . . 228

LE SOUDAGE . . . . . 229

Différents procédés de soudage . . . . . 229

*Soudage au chalumeau* . . . . . 231
Gaz utilisés . . . . . 231
Installation d'un poste de soudage . . . . . 232
Préparation des soudures . . . . . 234
Méthodes de soudage . . . . . 235
Soudage des divers métaux et alliages . . . . . 237

*Soudages électriques à l'arc.*
Principe . . . . . 237

*Soudage à l'électrode enrobée* . . . . . 238

Postes de soudage . . . . . 238
Électrodes . . . . . 240
Types d'enrobages . . . . . 241
Méthodes de soudage . . . . . 242
Défauts des soudures. Métaux et alliages soudables . . 246

*Soudages électriques à l'arc sous flux.*
Soudages sous flux gazeux . . . . . 246
Soudage à l'électrode réfractaire TIG . . . . . 247
Soudage à l'électrode fusible . . . . . 249
Soudage sous flux électro-conducteur . . . . . 251
Soudage automatique . . . . . 253

*Soudage au plasma* . . . . . 254

*Montages de soudage* . . . . . 255

*Soudage par bombardement électronique* . . . . . 259

*Soudage électrique par résistance* . . . . . 260
Soudage par points . . . . . 261
Soudage à la molette. . . . . 261
Soudage en bout ou par rapprochement . . . . . 262

Pages

Machines de soudage par points . . . . . 263
Méthode de soudage . . . . . 264
Soudage par bossages . . . . . 266
Machines de soudage à la molette . . . . . 266
Machines de soudage en bout ou par rapprochement . . 267

*Soudages hétérogènes.* . . . . . 269

*Soudage à l'étain.* . . . . . 269
Soudures et produits utilisés. . . . . 270
Méthode de soudage . . . . . 271

*Brasage* . . . . . 272

*Soudo-brasage* . . . . . 272

*Étude des effets des chauffages localisés* . . . . . 274
Dilatation et retrait. . . . . 274
Chauffage d'une barre et d'une tôle . . . . . 275
Soudage en chanfrein et en angle intérieur. . . . 276

*Remèdes aux effets de chaude de retrait* . . . . . 277
Avant soudage :
Étude de la position des soudures . . . . . 277
Ajustage des bords et positionnement avant soudage. 278
Déformations préalables. . . . . 278
Pendant le soudage . . . . . 279
Après soudage :
Martelage à froid et chaudes de retrait. . . . . 281
Chauffage local ou total . . . . . 281
Recuit de détente . . . . . 281
Défauts des soudures . . . . . 281
Contrôle et essais avant soudage. . . . . 282
Contrôle pendant le soudage . . . . . 284
Contrôle après soudage . . . . . 284
Collage des alliages légers . . . . . 286

*Chapitre V*

## OPÉRATIONS DE FINITION

BORDAGE . . . . . 289

*Bordage à la main* . . . . . 290

*Bordage à la machine* . . . . . 294

Pages

*Exécution de bords raidisseurs* . . . 298

MOULURAGE . . . . . 299

Outillage. . . . . 299
Moulurage de viroles . . . . . 300
Applications. . . . . 301

POLISSAGE . . . . . 302

Outillage. . . . . 302
Pratique du polissage . . . . . 304

*Chapitre VI*

## TRAVAIL DES PROFILÉS

Profilés laminés et profilés pliés . . . . . 307
Débit des profilés . . . . . 308

*Dressage des profilés à la main*. . . . . 309
*à la machine*. . . . . 313

*Cintrage des profilés*. . . . . 313

Cintrage à la main. . . . . 314
Cintrage des profilés en métaux non ferreux . . . . 317
Cintrage à la machine . . . . . 317
Simplification de la mise en forme par le soudage . . . 319

*Chapitre VII*

## TRAVAIL DES TUBES

*Tubes d'acier*. . . . . 323

Tubes gaz et tubes sans soudure . . . . . 324
Débit des tubes . . . . . 326
Cintrage à la main . . . . . 327
à la machine . . . . . 330
Assemblages des tubes d'acier. . . . . 335
Par éléments filetés . . . . . 335
Par soudage . . . . . 338
Par brides soudées . . . . . 340
Étanchéité. . . . . 341
Portées de joints . . . . . 342
Tubes en aciers inoxydables . . . . . 342
Tubes non ferreux . . . . . 344

# NOUVELLES UNITÉS

Depuis 1962, de nouvelles unités ont été normalisées et on ne doit plus employer, entre autres, le kilogramme-force (kgf) et l'hectopièze (hpz).

### *Nouvelles unités fondamentales (SI).*

*Forces* exprimées en *newton* (N).

*Pressions* et *contraintes :* exprimées en *pascal* (Pa) ou *newton par mètre carré* ($N/m^2$).

La grandeur de ces unités ne correspondant pas à celle des anciennes, on utilise des unités dérivées, de valeur sensiblement égale aux anciennes unités.

### *Unités utilisées dans l'industrie :*

| | | |
|---|---|---|
| *Forces* | : le daN | = 1,02 kgf = 10 N |
| *Pressions* | : le bar | = 1,02 kgf/cm² = 1 hpz = 1 daN/cm² |
| | | = 100 000 Pa = $10^5$ Pa |
| *Contraintes* | : l'hbar | = 1,02 kgf/mm² = 1 daN/mm² = $10^7$ Pa |
| *Travail* | : le daJ/cm² | = 1 kgf.m/cm² |

### *Exemples :*

| | |
|---|---|
| Effort de traction . . . . . | 3 000 daN |
| Pression dans un réservoir . . . . . | 15 bar |
| Résistance à la traction d'un acier : $R_m$ . | 42 hbar |
| Résilience d'un acier : KCU (ou KCV). . | 5 daJ/cm², à 0 °C |

## SYMBOLES DES PRINCIPAUX CORPS SIMPLES

On utilise deux catégories de symboles : *les symboles chimiques et les symboles métallurgiques normalisés*, ce qui peut prêter à confusion dans certains cas, en particulier pour les lettres C et Z.

La lettre C peut être : soit le *symbole chimique du carbone* (qui n'a pas de symbole métallurgique), soit le *symbole métallurgique du chrome.*

La lettre Z peut désigner : soit le *symbole métallurgique du zinc*, soit — placé en tête du symbole — *un acier fortement allié* (voir pages 21 et 22).

Dans cet ouvrage :

*Les métaux et corps simples* sont désignés par leur *symbole chimique*, sauf le cuivre et l'aluminium, qui sont désignés par leur symbole métallurgique, suivi d'un chiffre indiquant le titre de pureté. Ex : U6, U9 et A4, A5.

*Les alliages* sont désignés par leur *symbole métallurgique* (voir pages 13 à 28).

| Désignation | Symboles | | Désignation | Symboles | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Chim. | Mét. | | Chim. | Mét. |
| Aluminium | Al | A | Nickel | Ni | N |
| Bore | B | B | Phosphore | P | P |
| Cadmium | Cd | Cd | Plomb | Pb | Pb |
| Chrome | Cr | C | Silicium | Si | S |
| Cobalt | Co | K | Soufre | S | F |
| Cuivre | Cu | U | Titane | Ti | T |
| Étain | Sn | E | Tungstène (ou wolfram) | W | W |
| Fer | Fe | Fe | Vanadium | V | V |
| Magnésium | Mg | G | Zinc | Zn | Z |
| Manganèse | Mn | M | Zirconium | Zr | Zr |
| Molybdène | Mo | D | | | |

## SYMBOLES DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

| | | |
|---|---|---|
| $R_m$ ou $R$ | : charge de rupture (essai de traction). | Voir pages 8 et 9 |
| $R_e$ | : limite élastique *id.* | |
| $A$ % | : allongement pour-cent *id.* | |
| $N$ | : indice de qualité. | Voir page 11 |
| $K$ | : résilience. | Voir page 10 |

CHAPITRE PREMIER

# GÉNÉRALITÉS

## LES MÉTIERS DE LA CHAUDRONNERIE

Sans remonter jusqu'aux premiers artisans — et artistes — du travail des métaux en feuilles, on peut dire que les ancêtres des chaudronniers modernes sont des chaudronniers en cuivre, appelés *batteurs de cuivre* au moyen âge, puis *dinandiers*, du nom de la ville de Dinant (Belgique) où la fabrication des ustensiles en cuivre était particulièrement développée.

Plus près de nous, ces artisans prirent le nom de *chaudronniers*, vocable encore utilisé aujourd'hui, et au début de notre siècle, on différenciait les chaudronniers, d'après le métal travaillé :

le *chaudronnier en cuivre* et en laiton, métier le plus estimé et le mieux rétribué ;

le *chaudronnier en fer* (on devrait dire : en acier) ;

le *ferblantier*, en voie de disparition ;

le *plombier* et le *zingueur* (bâtiment).

Aujourd'hui, ces dénominations subsistent encore, mais on s'oriente de plus en plus vers la spécialisation, qui impose de nouvelles classifications ayant pour critères — quelquefois le métal travaillé — et plus généralement la technique utilisée, et le type de fabrication.

*Pour les techniques utilisées :*

Le pliage à la presse-plieuse.

L'emboutissage à la presse.

Le repoussage au tour.

Les soudages divers : TIG, MIG, MAG, sous flux solide, etc.

*Pour les types de fabrication :*

*Tôles minces acier non allié :* carrosserie automobile, mobilier métallique, réfrigérateurs, conduites de ventilation et d'aspiration, conditionnement, fumisterie, etc.

*Tôles moyennes :* bâtis de machines, montages divers, appareils de fusion, réservoirs divers, citernes, matériel roulant, constructions navales, conduites pour eau, pétrole, gaz, réservoirs à pression, etc.

*Tôles épaisses :* chaudières et réservoirs pour hautes pressions, conduites forcées, appareils pour les industries chimiques et pour le pétrole, enveloppes de réacteurs nucléaires, etc.

*Métaux non ferreux :* aviation, industries alimentaires, confiseries, distilleries, brasseries, conserveries, etc., industries chimiques, raffineries de pétrole, échangeurs thermiques, industries nucléaires, fusées cosmiques, etc.

*Tubes :* transport fluides divers : eau, air, gaz, chauffage, vapeur, pétrole, etc., constructions tubulaires, échafaudages, mobilier, etc.

*Profilés :* charpentes, supports de réservoirs et de tuyauteries, bâtiment, menuiserie métallique, serrurerie, etc.

Cette énumération incomplète, donne une idée de la diversité des applications du travail des métaux en feuilles et de la place très importante qu'elle occupe au milieu des industries modernes de transformation.

### *Difficultés du travail des métaux en feuilles.*

Ce sont : *le traçage ;*
*le travail des tôles à plat ;*
*la mise en forme ;*
*les assemblages.*

Le *traçage* fait l'objet d'un ouvrage de la même collection (1).

Le *travail des tôles* à plat, débit et préparation des tôles, que l'on retrouve dans des professions connexes.

*La mise en forme* qui était, il n'y a pas bien longtemps encore, la difficulté majeure de la profession, est de plus en plus reléguée au second plan, dans la plupart des fabrications, sauf dans le travail mécanique : cintrage, pliage et emboutissage sur presse, repoussage au tour, etc.

Chaque fois que c'est possible, on fractionne les ensembles en éléments assemblés par soudage, pour réduire au minimum la mise en forme, souvent difficile, et toujours coûteuse. De ce fait, les soudages — électriques surtout — ont pris une place prépondérante dans le travail des métaux en feuilles.

Sur les *soudages*, il est donné, dans ce cours, l'essentiel. Mais il existe, sur ce sujet, une bibliographie abondante publiée par les fabricants de matériel, et par les organismes spécialisés.

(1) *Traçage des métaux en feuilles*, par G. COTANT (Dunod).

# MATIÈRES PREMIÈRES UTILISÉES EN CHAUDRONNERIE

Le chaudronnier travaille tous les *métaux et alliages de laminage* sous les formes de *tôles*, surtout, de *profilés* et de *tubes*.

## ÉLABORATION

*Aciers non alliés :* coulés en lingots après fusion au cubilot-convertisseur, au four Thomas et au four Martin (aciers de qualité).

*Aciers alliés :* au four électrique à arc et au four à induction.

*Métaux et alliages non ferreux :* au four à creuset, au four réverbère et au four électrique.

### Fabrication des tôles d'acier

***Tôles épaisses*** (laminées à chaud). — Lingots transformés en *brames* (fig. I-1), par laminage, ou coulés directement de forme plate *(largets)*.

*2 procédés :* laminage discontinu,
laminage continu (le plus utilisé).

*Laminage discontinu :* sur laminoir duo (fig. I-2),
sur laminoir trio (fig. I-4),
sur laminoir réversible (fig. I-3).

***Laminage continu à chaud.*** — Lingots (15 t et plus) réchauffés et transformés en « brames » (fig. I-1) qui, après refroidissement, sont décriquées et coupées à la largeur de laminage.

Brames réchauffées et passées dans une série de cages quarto (fig. I-1) dégrossisseuses en ligne, et espacées, la tôle n'étant en prise que dans une seule cage à la fois (fig. I-5) ; puis, sans nouveau réchauffage, la tôle passe dans les cages quarto finisseuses, rapprochées (fig. I-6).

La tôle est en prise dans toutes les cages à la fois. Tôle renroulée en bobines, ou débitée à l'aide de cisailles volantes. Épaisseur : 2 à 5 mm. Vitesse de sortie de 20 à 40 km/heure.

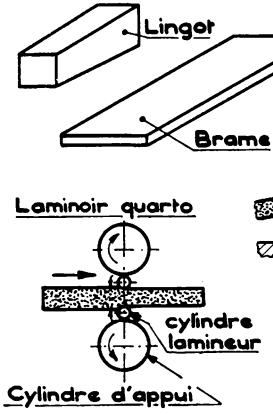



Fig. I-1.

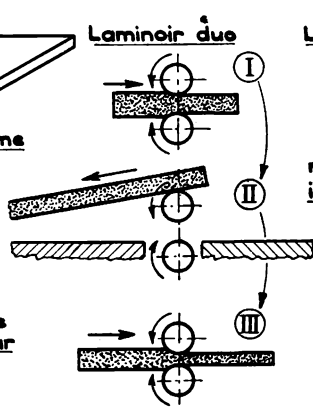



Fig. I-2.

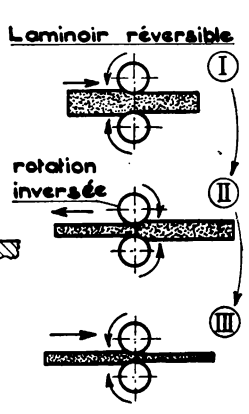



Fig. I-3.

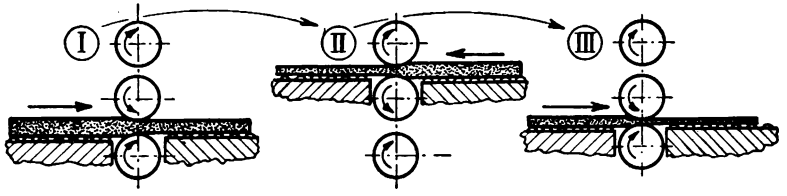



Fig. I-4. — Laminoir trio.

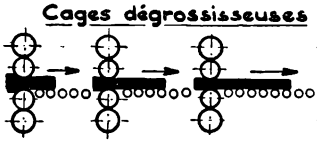



Fig. I-5.

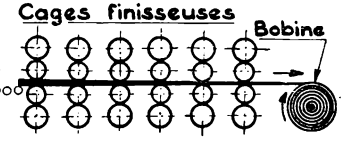



Fig. I-6.

***Laminage continu à froid.*** — *Chaîne de décapage :* bobines précédentes déroulées et passées dans une série de bacs et d'installations en ligne : bain de *décapage*, de *rinçage* et *lavage, brossage, graissage* puis rebobinage.

*Chaîne de laminage à froid :* bobines déroulées à nouveau et tôles réduites à l'épaisseur désirée par le passage dans une nouvelle série de cages finisseuses, comme figure I-6.

Épaisseur inférieure à 2 mm. Vitesse de sortie : 100 km/h.

*Chaîne de finition : recuit* à l'abri de l'air, dans des fours à atmosphère contrôlée (pas d'oxydation). Cisaillage des rives et de longueur et dressage.

**Fabrication des profilés et tubes acier** (voir chap. VI et VII).

## Métaux et alliages non ferreux.

*Tôles :* fabriquées comme tôles d'acier. Lingots plus petits et cadences de fabrication plus faibles (derniers rouleaux glacés).

*Profilés et tubes* peuvent être fabriqués comme ceux en acier. Petites et moyennes sections obtenues par *extrusion* ou *filage*. Lingot cylindrique réchauffé et soumis à une très forte pression dans un cylindre (fig. I-7). Le métal est expulsé par un orifice — *filière* — de la forme du profil à obtenir. Production rapide de profils souvent très compliqués, avec une grande précision.

*Tubes :* lingot percé pour recevoir une aiguille libre en acier (fig. I-7).

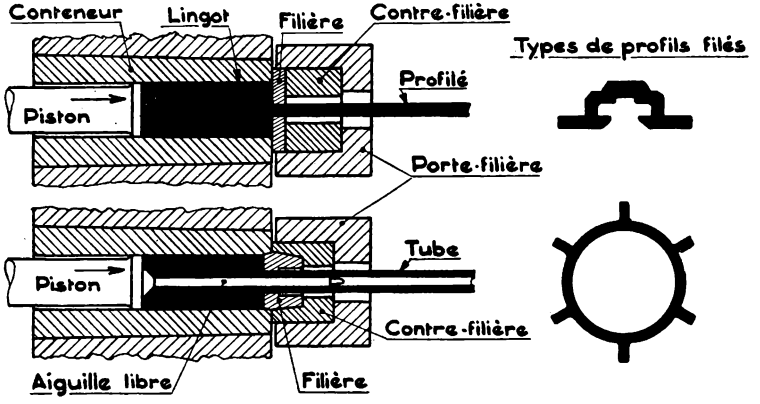



Fig. I-7. — Extrusion ou filage.

## PROPRIÉTÉS

Avant d'aborder l'étude des diverses matières premières, on peut se poser une question : comment choisir le métal ou l'alliage qui conviendra le mieux pour une fabrication déterminée ?

Selon que l'on se place au point de vue chaudronnage ou au point de vue utilisation, les réponses peuvent être différentes, voire opposées.

### Propriétés intéressant le chaudronnier.

*Soudabilité* (1). — C'est, à l'heure actuelle, la propriété la plus importante d'un métal ou d'un alliage, destiné à être chaudronné.

Un métal a une bonne soudabilité si, d'une part, les joints soudés donnent, en service, les mêmes garanties de qualité (résistance mécanique, résilience, inoxydabilité, résistance aux corrosions, etc.) que le métal de base, et si, d'autre part, l'opération de soudage ne présente pas de difficultés particulières d'exécution.

On distingue la *soudabilité métallurgique* et la *soudabilité constructive*.

*La soudabilité métallurgique* dépend de la nature de l'alliage, et de la teneur des éléments d'addition. Ceux-ci ont pour rôle d'augmenter la résistance mécanique, la résistance aux corrosions, etc., mais en même temps, ils diminuent la soudabilité. C'est le cas du C, du Mn, du Cr, etc., pour les aciers, du Cu pour le duralumin, etc.

Par ailleurs, les impuretés rendent les soudures fragiles : S et P pour les aciers, oxyde de cuivre pour le cuivre, etc.

A noter que pour une composition donnée *la soudabilité diminue quand l'épaisseur augmente.*

Pour un même alliage, *la soudabilité constructive* dépend de nombreux facteurs : tracé des pièces à souder, angles intérieurs vifs, fortes épaisseurs, position des soudures, préparation des bords, choix du procédé de soudage, qualité des électrodes, vitesse de refroidissement, traitements thermiques avant et pendant le soudage, etc.

Cette brève énumération peut donner une idée de la complexité des problèmes de soudabilité et de leur importance en chaudronnerie.

***La plasticité.*** — Les différentes méthodes de mise en forme : cintrage, pliage, étirage, rétreinte, etc. (tout comme le laminage, le filage, le forgeage) imposent aux tôles des déformations qui sont rendues possibles, par le déplacement interne des cristaux qui constituent le métal. Ces cristaux se déplacent suivant des plans de glisse-

(1) Voir p. 282.

ment qui s'orientent différemment suivant la nature et la direction de l'effort exercé.

Le *métal est plastique* si ces déplacements internes — ou écoulements de métal — sont possibles sans que les liaisons atomiques soient détruites, c'est-à-dire sans cassures ; le cuivre est plastique, la fonte ne l'est pas.

*La malléabilité* — possibilité de réduction en feuilles minces — et *la ductilité* — réduction en fils — sont des formes de la plasticité.

Industriellement, on divise les métaux et alliages en deux grandes catégories :

les métaux et alliages de laminage : *plastiques* (ex. : le cuivre) ;
les métaux et alliage de fonderie : *non plastiques* (ex. : la fonte).

***Faible sensibilité à l'écrouissage.*** — Le chaudronnage est d'autant plus facile que l'écrouissage est plus lent. Les aciers inoxydables s'écrouissent rapidement, alors que l'aluminium s'écrouit lentement (Voir page 29).

Tous les métaux et alliages de laminage possèdent — à des degrés divers — ces propriétés.

Toutefois, ce ne sont pas seulement leurs aptitudes à être chaudronnés qui doivent être prises en considération.

### Propriétés intéressant l'utilisateur.

Pour faire un choix, il faut tenir compte également des qualités exigées par l'utilisateur, qualités plus nombreuses et plus variées que les précédentes :

— la résistance mécanique à la température ambiante, aux très hautes et très basses températures, l'élasticité, la dureté, la résistance à l'oxydation et aux corrosions, les conductibilités thermique et électrique, la densité, l'aspect, la toxicité du métal ou de ses sels, etc., et dans un autre ordre d'idées, les facilités d'approvisionnement, le prix, etc.

Entre les exigences du constructeur et celles de l'utilisateur, il est nécessaire de trouver un compromis, et pour le faire en connaissance de cause, il faut posséder, sur les propriétés du métal, des indications qui sont fournies par des essais.

## ESSAIS DES MÉTAUX ET ALLIAGES

**Essais de laboratoire.** — Ces essais permettent de déterminer la composition, la présence d'impuretés par analyse chimique, la structure par macrographies et micrographies, la résistance aux corrosions, etc.

**Essais mécaniques.** — Parmi ces essais variés : traction, compression, flexion, dureté, résilience, emboutissage, etc., les essais de traction, d'emboutissage et de résilience fournissent au chaudronnier des indications très intéressantes sur la plasticité et la soudabilité.

***Essais de traction.*** — Les éprouvettes sont de section circulaire ou rectangulaire (tôles) et portent deux repères (fig. I-8) dont l'écartement est proportionnel à la section de l'éprouvette.

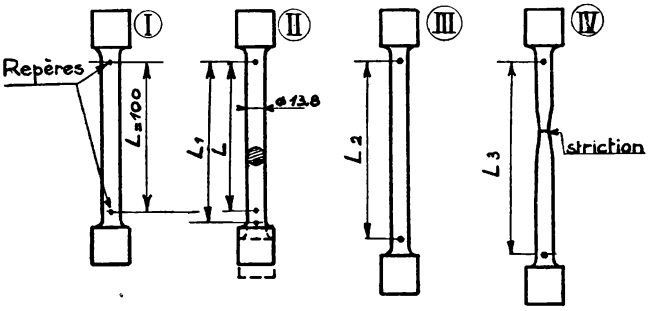



Fig. I-8. — Différentes phases d'un essai de traction. ø éprouvette = 13,8 mm.

*Sections circulaires :* ø 10, longueur entre repères = 50 (les plus utilisées), ø 20, longueur entre repères = 100.

*Sections rectangulaires :* de l'épaisseur de la tôle, largeur = 4 fois l'épaisseur au maximum.

Les éprouvettes sont soumises à un effort de traction sur une machine qui peut enregistrer les efforts (en daN) et les allongements correspondants (diagramme fig. I-9).

*1re phase. — Déformations élastiques.* — L'éprouvette s'allonge en $L_1$ mais reprend sa longueur initiale si on supprime l'effort de traction.

*2e phase. — Limite élastique.* — L'effort atteint une valeur pour laquelle l'éprouvette ne revient plus à sa longueur initiale. On mesure cet effort que l'on divise par la section, en mm², et on obtient la limite élastique désignée par $R_e$ et exprimée en hbar (1).

(1) 1 hbar ≈ 1 kgf/mm² (voir p. XVII).

*3e phase. — Déformations plastiques ou permanentes.* — Pour une augmentation relativement faible de l'effort, les allongements sont importants en $L_2$.

*4e phase. — Striction et rupture.* — En une zone variable, la section de l'éprouvette diminue rapidement, puis elle casse. Le diagramme indique la marche de l'essai.

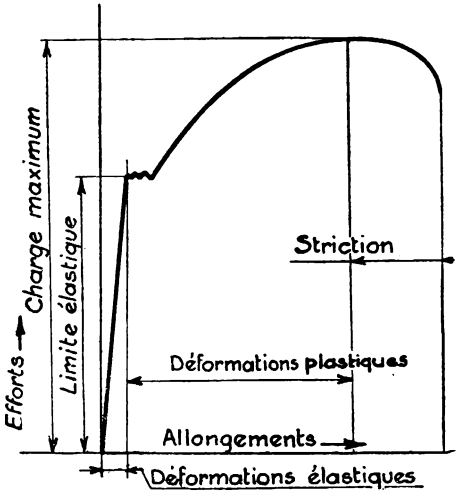



**Fig. I-9. — Diagramme d'un essai de traction.**

En divisant l'effort maximal exercé par la section initiale, en mm², on obtient la charge de rupture à la traction, désignée par $R_m$ (ou $R$) et exprimée en hbar.

On mesure, après rupture, l'écartement $L_3$ entre les repères et on obtient l'allongement pour cent par la formule :

$$A\ \% = \frac{L_3 - L}{L}.$$

Exemple : si L = 100 et $L_3 = 130$ : $A = \dfrac{130 - 100}{100} = 30\ \%$.

***Essais d'emboutissage.*** — *Essai Erichsen* pour tôles minces 2 mm maximum. Éprouvette de 70 × 70 minimum. Poinçon ⌀ 20.

La tôle, montée entre 2 mors non serrés, est emboutie par le poin-

çon (fig. I-10). On arrête l'essai lorsque la tôle se déchire et on mesure la profondeur de l'embouti $I_e$ (indice Erichsen) que l'on compare aux valeurs établies pour les différentes nuances de métaux et alliages.

La norme A 03-652, plus récente (nov. 67) est relative à un essai d'emboutissage, désigné par *IE*, exécuté avec le même outillage, et dans les mêmes conditions que l'essai Erichsen, mais *à flans bloqués* entre les mors.

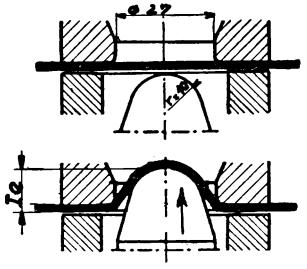


Fig. I-10. — Essai Erichsen.

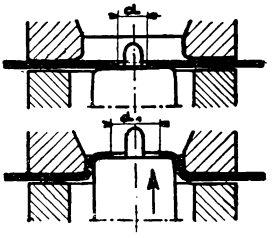


Fig. I-11. — Essai KWI.

*Essai KWI.* — Cet essai exécuté sur la même machine, diffère des précédents par la forme du poinçon (fig. I-11). L'éprouvette est percée avant l'essai et on arrête l'emboutissage lorsque des criques apparaissent sur le bord du trou, dont le diamètre initial — $d$ — est augmenté, et devient $d_1$. L'aptitude à l'emboutissage est chiffrée en tant pour-cent par le rapport $\frac{d_1 - d}{d} \times 100$.

***Essais de résilience.*** — La résilience (symbole $K$), qui est l'inverse de la fragilité, est déterminée à l'aide d'un mouton-pendule que l'on laisse tomber sur une éprouvette entaillée. Après rupture du barreau, le mouton remonte à une hauteur variable, ce qui permet de mesurer le travail absorbé par la cassure.

On fait ces essais sur éprouvettes Charpy qui sont, soit à entaille en U (essai KCU), soit à entaille en V (essai KCV). Ce dernier essai, exécuté à des températures décroissantes de + 20 °C à — 40 °C, est très utilisé pour apprécier la soudabilité des aciers non alliés et faiblement alliés.

Les aciers contenant de l'oxygène (aciers effervescents) donnent, à la température ambiante, des valeurs normales de résilience, avec des cassures *ductiles*. En abaissant la température de l'éprouvette,

la cassure devient brutale sans allongement et sous des *efforts très faibles (rupture fragile)*.

La température à partir de laquelle se manifeste cette fragilité, s'appelle *température de transition*, et elle est un élément important d'appréciation de la soudabilité. Les aciers *calmés* (qualités 3 et 4 voir page 14) ont une température de transition relativement basse, et une résilience KCV minimum garantie à — 20 °C. Ils sont utilisés dans les constructions soudées, où sont réunies les conditions favorables à l'amorce de ruptures fragiles (voir page 283).

***Essai de pliage.*** — Exécuté sur éprouvettes pliées — soit perpendiculairement, soit parallèlement au sens de laminage — avec des rayons intérieurs de pliage variables avec la nature, la qualité du métal, et avec l'épaisseur.

Les tôles minces sont généralement pliées à bloc, et les tôles moyennes et épaisses sur mandrins (voir fig. IV-149).

Dans tous les cas, la tôle ne doit présenter, après pliage, ni crique, ni gerçure.

## Appréciation de l'aptitude d'un métal à supporter les déformations plastiques.

On utilise les résultats des essais ci-dessus et particulièrement les essais d'emboutissage. Pour les fortes épaisseurs, l'essai de traction fournit des indications précieuses et le diagramme de la figure I-9 met en évidence deux types de déformations, avec leur valeur relative :

Les *déformations élastiques* (comparables à celles d'un bloc de caoutchouc ou d'un ressort), de faible importance généralement, disparaissent avec l'effort exercé.

Les *déformations plastiques* (comparables à celles d'une pâte à modeler), permanentes et définitives — et beaucoup plus importantes que les déformations élastiques — subsistent après la suppression de l'effort qui les a produites.

La mise en forme des métaux en feuilles se fait par déformations plastiques ; l'effort exercé doit être supérieur à la limite élastique, et inférieur à l'effort qui provoque la striction.

### *Éléments d'appréciation de la plasticité :*

*Allongements* % : la plasticité augmente avec *A*.

*Indice de qualité :* $N = R_m + 2{,}5\ A$. La plasticité augmente avec $N$.

Exemple : acier pour emboutissage : $N \approx 130$,
acier non allié : $N \approx 100$.

*Rapport* $\frac{R_e}{R_m}$. — La plasticité est d'autant plus élevée que ce rapport s'éloigne de 1.

Exemple : acier pour emboutissage : $\frac{R_e}{R_m} = \frac{20}{38} = 0{,}52.$

Cuivre : $\frac{R_e}{R_m} = \frac{7}{21} = 0{,}31.$

# DIFFÉRENTS MÉTAUX ET ALLIAGES TRAVAILLÉS EN CHAUDRONNERIE

## MÉTAUX ET ALLIAGES FERREUX

Le **fer pur** peu utilisé, sauf pour quelques travaux spéciaux. Excellentes plasticité et soudabilité. Tout ce qui est dit, ci-après, pour les aciers non alliés est valable pour le fer.

## ACIERS NON ALLIÉS

**Classe A** (Voir tableau p. 14). — Par la norme A 35-501 d'avril 1968, la nuance ADx est supprimée, et remplacée par la nuance A 33-1 et A 33-2, cette dernière pour tôles seulement.

Dans tous les aciers de la classe A, la charge de rupture $R_m$ mini, ou la limite élastique $R_e$ mini, *sont garanties*. Ex. : pour A 33 : $R_m$ mini = 33 hbar.

Les nuances destinées aux constructions métalliques, sont désignées par leur limite élastique mini. Exemple : A 42 devient E 26 : $R_e$ mini = 26 hbar (voir tableau p. 14).

En chaudronnerie, parmi les aciers non alliés, on travaille surtout les nuances A 33, A 34, E 24, E 26, E 30 et E 36. Dans chaque nuance, on trouve des qualités de valeur croissante : 1, 2, 3 et 4.

Suivant leur mode d'élaboration, les aciers sont, soit *effervescents* (contenant de l'oxygène) dans les qualités 1 et 2 surtout (voir tableau page 14), soit *non effervescents* (NE). Ces derniers sont *calmés* par addition de silicium et d'aluminium. Dans les qualités 3 et 4, par addition de Niobium, de Titane et de Vanadium (le tout < 0,20 %) on obtient un *calmage spécial* (CS) qui donne des aciers à grain très fin, avec une résilience KCV à — 20 °C, garantie. Ces aciers sont recommandés pour les constructions soudées dont les fortes épaisseurs, le tracé, les conditions d'exécution (bridage) la température d'utilisation, etc., présentent des risques de ruptures fragiles (voir essais de résilience p. 10, et ruptures fragiles, p. 282-283).

**Classes C et XC.** — Ces aciers ont une teneur en carbone garantie, et sont utilisés surtout pour les traitements thermiques. En chaudronnerie, on les utilise peu, sauf dans les nuances à bas carbone, appréciées pour leur soudabilité et leur excellente plasticité.

## ACIERS NON ALLIÉS. CLASSE A

NF. A 35 501
Extraits

| Nuances | Qualité | C % max. | *Re* (hbar) ≈ *e* ⩽ 30 | *Rm* (hbar) ≈ | *A* % *e* ⩽ 30 ≈ | Pliage à 180° *e* ⩽ 16 r | Résilience (daJ/cm²) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | KCU + 20° C *e* ⩽ 16 | KCV 0° C | KCV — 20° C |
| A 33 | 1 | — | 18 | 33-50 | 18 | 3 *e* | — | — | — |
| | 2 | | 18 | | 18 | 3 *e* | | | |
| A 34 | 1 | — | 17 | 34-42 | 26 | 1 *e* | 7 | — | — |
| | 2 | | 17 | | 28 | 1 *e* | | | |
| E 24 (A 37) | 1 | 0,22 | 24 | 37-45 | 24 | 1,5 *e* | 7 | — | — |
| | 2 | 0,22 | 24 | | 26 | 1,5 *e* | | — | — |
| | 3 (1) | 0,18 | 24 | | 26 | 1 *e* | | 3,5 | — |
| | 4 (2) | 0,18 | 24 | | 28 | 1 *e* | | — | 3,5 |
| E 26 (A 42) | 1 | 0,25 | 26 | 42-50 | 21 | 2,5 *e* | 7 | — | — |
| | 2 | 0,25 | 26 | | 23 | 2 *e* | | — | — |
| | 3 (1) | 0,20 | 26 | | 24 | 1,5 *e* | | 3,5 | — |
| | 4 (2) | 0,20 | 26 | | 27 | 1,5 *e* | | — | 3,5 |
| E 30 (A 47) | 2 (1) | 0,27 | 28 | 47-57 | 21 | 3 *e* | 6 | — | — |
| | 3 (1) | 0,22 | 30 | | 21 | 2,5 *e* | | 3,5 | — |
| | 4 (2) | 0,22 | 30 | | 23 | 2,5 *e* | | — | 5 |
| E 36 (A 52) | 2 (1) | 0,27 | 36 | 52-62 | 20 | 4 *e* | 6 | — | — |
| | 3 (1) | 0,22 | 36 | | 20 | 3,5 *e* | | 3,5 | — |
| | 4 (2) | 0,22 | 36 | | 22 | 3,5 *e* | | — | 5 |

(1) Non effervescent (NE)
(2) Non effervescent. Calmage spécial (NE. CS)

*Désignation* par leur teneur en carbone × 100 : C 10, C 20, C 35 — XC 10, XC 18. Exemple : C 10 : acier non allié contenant 0,1 % de carbone.

Pour tous les aciers non alliés : densité ≈ 7,8, température de fusion ≈ 1 450 °C, température de recristallisation : de 850 à 900 °C.

***Propriétés des aciers non alliés.*** — Prix de revient relativement faible, propriétés mécaniques élevées, excellente soudabilité, mise en forme facile. *Inconvénients :* s'oxydent facilement (rouille). Voir plus loin : Protection, page 18.

*Formes d'utilisation : tôles, profilés, tubes.*

## Tôles.

Les normes sont souvent modifiées et on trouve, chez les fournisseurs et les utilisateurs, des désignations anciennes et nouvelles.

### *Classification.*

*D'après leur épaisseur :*

Tôles minces $e \leqslant 2$ mm.
Tôles moyennes de 3 à 6 mm.
Tôles fortes $e > 6$ mm.

*D'après leur utilisation :*

Tôles minces : Tôles noires.
Tôles pour emboutissage à froid.

Tôles moyennes et épaisses :

Tôles de construction : T.
Tôles de coques : N.
Tôles de chaudières : C.

*D'après leur aspect :*

Tôles noires,
Tôles décapées.

TÔLES POUR EMBOUTISSAGE ET PLIAGE A FROID. — Ces tôles sont :

a) *de qualité courante :* tôles commerciales *TC*, en tôles moyennes et épaisses, et en tôles minces : *LFQC* (laminées à froid qualité courante);

b) *à indices :* un indice d'aspect et un indice d'aptitude à l'emboutissage.

Les deux tableaux ci-dessous donnent une correspondance approximative entre les anciennes et les nouvelles désignations.

INDICES D'ASPECT

| Anciennes désignations | | Nouvelles désignations (NF A 36-401 minces (1) | Aspect |
|---|---|---|---|
| moyennes et épaisses laminées à chaud | minces à froid | | |
| | LFQC | T C | Pas précisé |
| SP | X | X | Simple décapage |
| DP | X | X | Double décapage |
| ABO | Z | Z | Demi-glacée |
| AB | Z | Z | Glacée |

(1) Pas de symbole d'aspect pour les tôles moyennes et fortes.

APTITUDE A L'EMBOUTISSAGE

| Anciennes désignations | | Nouvelles désignations | | $R_m$ (hbar) | | $A$ % | | Rayon de pliage à 180° | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| moyennes et fortes | minces | minces NF A 36 401 | moyennes et fortes NF A 36 302 | minces | fortes | minces | fortes | minces | fortes |
| | | | 10 C | | 30/50 | | | | 1 à 1,5 $e$ |
| | | TC | | 42 | | 23 | | à bloc | |
| D | O | | | | | | | | |
| | | | 11 C | | 44 | | 26 | | 1 $e$ |
| DD | O | E | | 38 | | 30 | | à bloc | |
| EDD | M | | 12 C | | 39 | | 29 | | 0 $e$ |
| SEDD | P | ES | | 35 | | 36 | | à bloc | |
| | | | 13 C | | 38 | | 33 | | 0 $e$ |
| SSEDD | S | | | | | | | | |

Exemple de désignation d'une tôle mince à indices : tôle X E ou Z ES.

TÔLES D'ACIERS NON ALLIÉS POUR CHAUDIÈRES ET APPAREILS A PRESSION (NF A 36 205). Cette norme concerne les tôles moyennes et fortes, en 4 nuances : A37, A42, A48 et A52; chaque nuance se subdivise en 2 catégories : *C* et *P*, qui se font chacune en 2 qualités de valeur croissante : *1* et *2*.

*Aciers C.* — Pour travail à des températures notablement supérieures à la température ambiante. Limite élastique élevée à haute température et essais de résilience à 0 °C, sur éprouvette en V (KCV).

*Aciers P.* — Pour température ambiante. Valeur minimale garantie de résilience à — 20 °C sur éprouvette en V.

*Désignation* : Tôle A37 C1 ou A37 C2 — A37 P1 ou A37 P2, etc.

**TÔLES NOIRES - FORMATS LES PLUS COURANTS**

| | Minces | | | | | | | | | | Moyennes | | | | Epaisses | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1. | 1,2 | 1,5 | 2. | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 14 | 15 | 16 | 18 | 20 | 22 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| 800 x 2 000 | — | — | — | — | — | — | — | o | o | o | o | o | o | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 000 x 2 000 | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o |
| 1 000 x 3 000 | — | — | — | — | — | o | — | o | o | o | o | o | o | o | — | o | — | o | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 000 x 4 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 100 x 2 100 | — | — | — | — | — | o | — | o | o | o | o | o | o | o | — | o | — | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 100 x 3 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | o | — | o | o | o | o | — | o | — | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 200 x 2 200 | — | — | — | — | — | o | o | o | o | o | o | o | o | o | — | — | — | — | — | — | o | — | — | o | — | — | — | — | — | — |
| 1 200 x 3 000 | — | — | — | — | — | — | — | o | o | — | o | o | o | o | — | — | — | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 200 x 4 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | o | o | o | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 250 x 2 500 | — | — | — | — | — | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | — | o | o | o | o | o | — | o | — | o | o | o | — | — |
| 1 300 x 2 300 | — | — | — | — | — | — | o | o | o | o | o | o | o | o | — | — | — | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 300 x 3 000 | — | — | — | — | — | — | — | o | o | o | o | o | o | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 300 x 4 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | o | o | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 400 x 3 000 | — | — | — | — | — | — | — | o | o | o | o | o | o | o | — | — | — | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 500 x 3 000 | — | — | — | — | — | o | — | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o | o |
| 1 500 x 4 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | o | o | o | o | — | o | — | — | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 500 x 5 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | o | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 500 x 6 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | o | o | o | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 600 x 3 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | o | o | o | o | — | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 600 x 4 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | o | — | o | o | — | — | — | — | Pour toutes les épaisseurs | | | | | | | | | | | |
| 1 700 x 3 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | o | o | o | — | — | — | — | il existe d'autres formats. | | | | | | | | | | | |
| 1 700 x 4 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | o | — | — | — | — | Consulter les fournisseurs | | | | | | | | | | | |
| 1 800 x 3 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | o | o | o | o | — | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 800 x 4 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | o | o | o | o | — | — | — | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 800 x 6 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | o | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 2 000 x 3 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | o | o | o | o | — | o | — | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 2 000 x 4 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | o | o | o | o | — | o | — | o | o | — | o | — | — | o | — | — | — | — | — | — |
| 2 000 x 6 000 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | o | o | o | o | — | o | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

Les tôles, surtout en faible épaisseur, sont souvent désignées par leur masse (1), plutôt que par leur épaisseur.

Une tôle de 1 $m^2$ en 1 mm d'épaisseur a pour volume 1 $dm^3$ et par suite, le nombre qui exprime sa masse est le même que celui qui exprime la densité du métal. Pour l'acier, on arrondit pratiquement à 8 kg (au lieu de 7,8).

***Mesure de l'épaisseur d'une tôle :***

*Au pied à coulisse :* peu précis : bavures et déformations au bord.

*Au palmer :* très précis, donne l'épaisseur au bord seulement.

*Par pesée* (tôles rectangulaires, carrées ou circulaires).

**Profilés et tubes** (voir chapitres VI et VII).

**Protection de l'acier.**

La sensibilité de l'acier à l'oxydation oblige à le protéger par des revêtements :

*Graissage* (tôles décapées).

*Peintures anti-rouille*, vernis, laques diverses (carrosseries automobiles).

*Émaillage* déposé au trempage ou au pistolet, puis cuisson au four (fragile aux chocs).

*Galvanisation, étamage, plombage* par trempage dans un bain en fusion, ou par électrolyse.

*Nickelage, chromage :* dépôts électrolytiques.

*Métallisation au pistolet :* après sablage ou grenaillage des tôles, projection par air comprimé, de métal fondu dans une flamme oxy-acétylénique (surtout zingage).

*Revêtements en matières plastiques*, contre l'oxydation et les corrosions ; amélioration de l'aspect et coloration (applicables aux alliages légers).

(1) Au lieu de poids, on doit employer « masse ».

# ACIERS ALLIÉS UTILISÉS EN CHAUDRONNERIE

Aciers avec additions d'éléments destinés à améliorer :

les caractéristiques mécaniques : $R_m$, $R_e$ surtout, $A$ et $K$ ;
la résistance à l'oxydation et aux corrosions ;
les caractéristiques mécaniques aux hautes ou basses températures ;
l'aspect (décoration).

***Principaux éléments d'addition et leur rôle*** (1) ***:***

*Carbone* : 0,1 à 0,2 %, augmente $R_e$ et $R_m$, diminue $A$ et $K$ et la soudabilité.

*Manganèse et silicium* : augmente $R_e$ et $R_m$, diminue $A$ et $K$ ; le manganèse améliore la résistance aux corrosions.

*Cuivre* : augmente $R_e$ et $R_m$, diminue $A$ et $K$, améliore la résistance à l'oxydation atmosphérique (aciers patinables).

*Chrome* : rend les aciers inoxydables, à la température ambiante et aux hautes températures.

*Nickel* : avec le chrome rend les aciers inoxydables, améliore *à la fois : $R_e$, $R_m$*, d'une part et $A$ et $K$, d'autre part ; augmente la résistance aux basses températures. Favorise la formation de la structure austénitique.

*Molybdène* : ajouté au chrome et au nickel, augmente l'inoxydabilité et la résistance aux corrosions.

*Autres éléments : vanadium, titane, phosphore, aluminium*, etc.

## Aciers faiblement alliés.

Aucun des éléments d'addition ne dépasse la teneur de 5 %. En chaudronnerie, la teneur est souvent inférieure à 1 % et, rarement supérieure à 2 %.

*Prix plus élevé* — qu'aciers non alliés — compensé par un *allégement* (aciers à haute limite élastique) et par une *durée prolongée* et une *diminution de l'entretien* (résistance à l'oxydation et aux corrosions).

La *mise en forme* exige des machines plus puissantes (20 % en plus) et l'*effet de ressort* gêne le pliage, le cintrage et la rétreinte surtout.

(1) Voir symboles normalisés page XVIII.

## TYPES D'ACIERS ALLIÉS UTILISÉS EN CHAUDRONNERIE

*Aciers faiblement alliés*

| Type<br>Aciers au : | Composition | | | | | | | Caractéristiques mécaniques | | | Températures °C | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Mn | Si | Cu | Ni | Cr | Mo | $R_e$ (hbar) (1) | $R$ ou $R_m$ (hbar) (1) | $A$ % | Recuit | Fusion |
| Mn-Si . . . . | 0,22 | 1,40 | 0,50 | | | | | 28 | 50 | 23 | 900 | 1 450 |
| Mn-Ni-Cr-Mo. . | 0,2 | 1,20 | 0,30 | | 0,40 | 0,30 | 0,20 | 40 | 60 | 20 | 850 | 1 450 |
| Cr-Mo . . . . 15 CD.2.05 | 0,20 | 0,7 ≈ | 0, 2 ≈ | — | — | 0,5 ≈ | 0,5 ≈ | 28 | 50 ≈ | 25 | 900 | 1 450 |

(1) 1 hbar ≈ 1 kgf/mm².
Pour tous ces aciers : densité ≈ 7,8.

La soudabilité diminue lorsque la teneur en éléments d'addition et l'épaisseur augmentent. Par effet de trempe, les zones soudées durcissent (augmentation de la dureté et de la fragilité) ce qui exige des précautions particulières (voir p. 30).

*Utilisation :* charpentes à haute résistance, ponts, appareils à pressions, installations pétrolières, conduites forcées, centrales thermiques, etc.

On utilise les aciers au Cu, au Cu-P, au Cr-Mo, au Cr-Cu, au Mn-Ni-Cu, au Si-Cr au Cr-Cu-Mo, au Ni-Cr-Mo, au Cr-Mo-V, etc. (voir tableau, p. 20).

**Aciers fortement alliés** (voir tableau p. 22).

Un élément d'addition, au moins, dépasse la teneur de 5 %.

*Classement d'après leurs propriétés :*

*Aciers réfractaires :* résistent bien aux hautes températures (1 000 °C et plus). Teneurs très élevées en Ni et en Cr.

*Aciers résistant bien aux corrosions* (aciers inoxydables) : teneurs élevées en Cr et en Ni.

*Classement d'après leur structure :*

*Aciers ferritiques :* magnétiques ; ne durcissent pas à la trempe.

*Aciers austénitiques :* amagnétiques ; aciers au Ni-Cr, genre 18/10.

***Propriétés générales.*** — Mise en forme exige plus de puissance que celle des aciers non alliés ($R_m$ et $R_e$ plus élevés et effet de ressort). Peuvent prendre et conserver un beau poli en raison de leur dureté (rayures) et de leur inoxydabilité (oxydation, corrosions). Très coûteux.

*Aciers ferritiques à 9 % de nickel* (Z 13 N 9) : excellentes propriétés mécaniques aux basses températures (— 200 °C) après traitements thermiques (voir tableau, p. 22). Moins chers que les 18/10 ; réservoirs et tuyauteries pour gaz liquéfiés : oxygène, azote, méthane, etc.

*Aciers ferritiques à 17 % de chrome* (Z 8 C 17) : moins inoxydables, mais aussi moins coûteux que les austénitiques ; conviennent pour les faibles corrosions, et notamment pour la décoration.

*Aciers austénitiques type 18/10* (voir tableau p. 22) : résistent bien aux corrosions, surtout les nuances avec molybdène. Leur grand allongement (50 à 60 %) leur permet de supporter des déformations plastiques très importantes (emboutissage très profond). Ce sont les plus utilisés en chaudronnerie.

| Structure | Désignation normalisée | | Composition % | | | | | Caractéristiques mécaniques | | | Traitements thermiques °C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | AFNOR (française) | ASA (américaine) | C | Cr | Ni | Mo | Ti | $R_e$ (hbar) | $R_m$ (hbar) | $A$ % | |
| Ferritique. . | Z 13 N 9 | | 0,13 | | 9 | | | 42 | 62 | 22 | (1) |
| Ferritique. . | Z 8 C 17 | 430 | 0,08 | 17 | | | | 30 | 50 | 25 | 790 |
| Austénitique . | Z 6 CN 18-10 | 304 | 0,06 | 18 | 10 | | | 22 | 60 | 50 | 1 075 (2) |
| Austénitique . | Z 3 CN 18-10 | 304 L | 0,03 | 18 | 10 | | | 20 | 55 | 55 | 1 075 (2) |
| Austénitique . | Z6 CND 18-12 | 316 | 0,06 | 18 | 12 | 2,5 | | 22 | 60 | 50 | 1 075 (2) |
| Austénitique . | Z3 CND 18-12 | 316 L | 0,03 | 18 | 12 | 2,5 | | 20 | 55 | 50 | 1 075 (2) |
| Austénitique . | Z10CNT18-10 | 321 | 0,10 | 18 | 10 | | 0,5 | 25 | 60 | 40 | 1 050 (2) |

(1) Trempé vers 800 °C et revenu vers 600 °C (Trempe d'adoucissement).
(2) Tôles $e \leq 5$ : refroidies à l'air — Pour $e > 5$ : refroidies à l'eau.

Bonne tenue aux très basses températures et très mauvaise conductibilité thermique.

Soudage à l'arc, et sous protection gazeuse ; soudabilité améliorée par une faible teneur en carbone, et par addition de titane ou de niobium. Ces deux métaux s'opposent à la formation de carbures de chrome qui provoquent des corrosions intergranulaires.

***Utilisations.*** — Industries alimentaires et chimiques, raffineries de pétrole, laboratoires, cellulose, etc.

*Formes d'utilisation des aciers alliés :* tôles, profilés et tubes.

**Aciers plaqués.** — *Aciers plaqués* sur une face ou sur les deux faces. Acier non allié ou faiblement allié, laminé entre deux tôles (ou contre une tôle seulement) d'un alliage protecteur : acier inoxydable, nickel, Monel, Inconel, etc. Épaisseur du placage 10 à 20 % de l'épaisseur totale, avec un minimum de 0,8 mm et un maximum de 6 mm. Utilisés sous formes de tôles seulement. Se comportent à la mise en forme, comme un métal homogène et se soudent suivant une technique spéciale. Moins chers que les tôles pleines d'inoxydables et d'alliages de nickel, et utilisés dans les industries chimiques surtout.

## MÉTAUX ET ALLIAGES NON FERREUX

**Cuivre.** — Symbole métallurgique U. Très malléable, résiste bien à l'oxydation et à certaines corrosions ; bonnes caractéristiques mécaniques (état écroui). *Excellente conductibilité thermique ;* soudabilité moyenne : pour les constructions soudées, on doit utiliser du cuivre désoxydulé, dit cuivre soudable (qualités U9 ou *d* et U6 ou *c*).

Livré sous formes de tôles, profilés et tubes, à l'état recuit, ou écroui. Utilisé surtout dans les échangeurs thermiques : industries alimentaires, alambics, industries chimiques, tuyauteries, etc.

**Laitons.** — Alliages cuivre + zinc (voir tableau, p. 27).

En chaudronnerie, on travaille surtout le laiton 1er titre : Cu : 67, Zn : 33 (U-Z33). Très malléable à froid ($A$ % = 53), cassant à chaud. Se prête bien à la mise en forme à la presse : emboutissages profonds. Soudabilité bonne au chalumeau (flamme oxydante) et sous flux gazeux.

En tôles et en tubes ; moins employé que le cuivre.

*Utilisations :* surtout pour pièces embouties, nickelées ou chromées après mise en forme : accessoires d'automobiles, décoration, etc.

## ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

Caractérisés surtout par leur faible densité : 2,7.

**Aluminium.** — Symbole métallurgique A, suivi d'un chiffre qui indique le titre de pureté : A4, A5, etc.

Résistance mécanique et dureté faibles. Malléabilité et soudabilité excellentes (au chalumeau et surtout sous flux gazeux). Très bonne conductibilité thermique. Résistant à l'oxydation (air sec) et à certaines corrosions, mais attaqué par de nombreux agents chimiques.

Livré — comme ses alliages — sous formes de tôles, tubes et profilés ; à l'état recuit ou écroui 1/4 dur, 1/2 dur, 3/4 dur ou dur.

***Utilisations.*** — Industries chimiques et alimentaires, décoration, réflecteurs (A9), etc.

**Alliages d'aluminium.** — Tous les éléments d'addition ont pour rôle essentiel, d'améliorer les faibles caractéristiques mécaniques de l'aluminium — et dans certains cas — la résistance à l'oxydation et aux corrosions.

*Principaux éléments d'addition :* Si, Mn, Cu, Mg et à plus faible teneur : Fe, Ni, Cr, Ti, Pb (1).

*Deux catégories d'alliages :* sans traitements thermiques et à traitements thermiques (voir tableau, p. 25).

***Propriétés caractéristiques de quelques alliages types :***

A-M : le manganèse augmente la résistance mécanique sans diminuer la malléabilité, s'emboutit très facilement.

A-G3, A-G4 et A-G5 *:* l'addition de magnésium (3,4 ,5 % etc.) augmente très sensiblement $R_e$ et $R_m$, en diminuant $A$. Mise en forme plus difficile, sur métal recuit ou à chaud (effet de ressort et écrouissage rapide). Soudabilité excellente. Bonne tenue aux basses températures, et à l'eau de mer : A-G4 et A-G5.

Très employés : marine, chemins de fer, industries du froid et nucléaires, etc.

A-SG *:* s'emboutit très facilement et acquiert, après traitement, une bonne résistance mécanique. Soudabilité assez bonne.

A-U4G *:* après trempe et maturation, *aussi résistant que l'acier* ($R_m$ = 40 hbar). *Très mauvaise soudabilité*, s'oxyde faci-

(1) Voir symboles normalisés page XVIII.

## TYPES D'ALLIAGES D'ALUMINIUM UTILISÉS EN CHAUDRONNERIE

| Désignation normalisée | Ancienne désignation | Principaux éléments d'addition | | | | Caractéristiques mécaniques | | | | | | Température °C | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | $R_e$ (hbar) | | $R_m$ (hbar) | | $A$ % | | | |
| | | Si | Cu | Mg | Mn | Recuit | Écroui | Recuit | Écroui | Recuit | Écroui | Recuit | Trempe |
| *Sans traitements thermiques* | | | | | | | | | | | | | |
| A4 . . . | Aluminium | Pureté : 99 % | | | | | | 8 | 16 | 35 | 3 | 370 | |
| A5 . . . | Aluminium | Pureté : 99,5 % | | | | | | 7,5 | 15 | 38 | 4 | 370 | |
| A-M . . | Alu-manganèse | 0,6 | 0,2 | 0,1 | 1/1,5 | 3 | 14 | 9 | 17 | 28 | 3 | 370 | |
| A-G3 . . | Duralinox | 0,3 | 0,1 | 3 | 0,2/1 | 8 | 24 | 20 | 28 | 18 | 4 | 390 | |
| *Avec traitements thermiques* | | | | | | | | | | | | | |
| A-SG . . | Almasilium | 0,8/1,5 | 0,1 | 0,7/1,3 | 1 | 5 | 26 (1) | 10 | 29 (1) | 26 | 10 (1) | 370 | 510 (3) |
| A-U4G. . | Duralumin | 0,5 | 4 | 1,5 | 0,7 | 10 | 28 (1) | 18 | 40 (1) | 14 | 13 (1) | 370 (2) | 490 (3) |

(1) Après traitement thermique.
(2) Refroidissement lent.
(3) Refroidissement à l'eau froide et maturation 4 jours à la température ambiante.
Pour tous ces alliages : densité $\approx$ 2,7 et température de fusion $\approx$ 650 °C.

lement surtout en milieu humide ; on le protège par une oxydation anodique. Utilisé en aviation, matériel roulant, bennes, etc.

A-Z8GU : résistance mécanique élevée ; ne se soude pas. Mise en forme difficile.

**Le magnésium.** — Le magnésium n'est pas chaudronné à l'état pur. Ses alliages contiennent 5 à 6 % d'aluminium (symbole G-A6Z1) ou 2 % de manganèse (G-M2).

Leur extrême légèreté — densité 1,8 — en indique l'emploi en aviation dans les pièces qui ne sont pas soumises à de très gros efforts. Ils peuvent se chaudronner à froid et à chaud et se souder au chalumeau et à l'argon. Leurs qualités mécaniques peu élevées ($R_m$ de l'ordre de 20 à 25 hbar), leur faible résistance à l'oxydation en limitent l'utilisation. On les protège par immersion dans un bain acide, neutre, ou basique (mordançage) qui permet l'accrochage d'une couche isolante sur toute la surface.

Ils sont livrés comme les alliages d'aluminium sous forme de tôles, tubes et profilés divers.

**Le plomb.** — L'expression « se travaille comme du plomb » est justifiée par la très grande malléabilité de ce métal.

Sa densité est élevée (11,3), sa résistance mécanique extrêmement faible et ses sels sont toxiques. Par contre, il offre une résistance remarquable à l'oxydation, à l'action de l'acide sulfurique, et il se soude très facilement.

On l'utilise sous forme de tuyaux de petits et moyens diamètres dans les installations souterraines et en tables livrées roulées en 1 m de largeur dans les industries chimiques (bacs ou citernes à acide sulfurique en particulier).

**Le zinc.** — Le zinc est caractérisé par son excellente résistance à l'action de l'air humide qui le fait employer dans les travaux de couverture (bâtiment) et pour la galvanisation de l'acier.

On l'emploie presque uniquement sous forme de tôles dont les dimensions courantes sont : 2 m × 0,50 m, 2 m × 0,65 m, 2 m × 0,80 m et 2 m × 1 m. L'épaisseur est indiquée par un numéro, de 6 (0,34 mm) à 24 (2,3 mm) environ.

Les n$^{os}$ 11 (0,6 mm), 12 (0,66 mm) et 14 (0,8 mm) sont les plus utilisés en couverture.

***L'étain.*** — L'étain est un métal à bas point de fusion (232 °C), à faible résistance mécanique et qui ne s'altère pas à l'air. On ne le travaille que rarement en chaudronnerie industrielle. Avec le plomb, il donne des alliages employés en soudure dite « à l'étain ».

## Cuivre et laitons

| Désignation | Désignation normalisée | Composition | | Caractéristiques mécaniques | | | | | | Température °C | | Densité |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $R_e$ (hbar) | | $R_m$ (hbar) | | $A$ % | | | | |
| | | Cu | Zn | Recuit | Écroui | Recuit | Écroui | Recuit | Écroui | Recuit | Fusion | |
| Cuivre . . . | U9, U6, U4 | Pureté : 99,95 à 99,6 % | | 7 | 22 | 21 | 40 | 45 | 8 | 750 | 1 080 | 8,9 |
| Laiton 1er titre . | U-Z33 | 67 | 33 | 8 | 35 | 32 | 50 | 55 | 8 | 700 | 4940 | 8,4 |

## Nickel et alliages

| Désignation | Composition | | | | | | Caractéristiques mécaniques | | | | | | Température de recuit °C | Densité |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | $R_e$ (hbar) | | $R_m$ (hbar) | | $A$ % | | | |
| | Ni | Co | Cu | Cr | Fe | Zn | Recuit | Écroui | Recuit | Écroui | Recuit | Écroui | | |
| Nickel . . . | 98 | 2 | | | | | 14 | 60 | 50 | 70 | 40 | 5 | 800 | 8,9 |
| Monel . . . | 67 | | 30 | | 2 | | 24 | 60 | 50 | 70 | 40 | 5 | 800 | 8,8 |
| Inconel. . . | 80 | | | 13 | 6,5 | | 24 | 70 | 60 | 90 | 40 | 7 | 900 | 8,5 |
| Maillechort . | 18 | | 62 | | | 20 | 16 | 37 | 40 | 60 | 40 | 8 | 700 | 8,7 |

**Nickel et ses alliages.** — ***Propriétés générales*** (voir tableau, p. 27). — Caractérisés par une *excellente résistance* aux corrosions, jointe à de *très bonnes caractéristiques mécaniques*. Mise en forme possible (*A* % élevé) mais avec des *machines plus puissantes* que pour l'acier. *S'écrouissent rapidement*. Peuvent prendre et conserver un *poli remarquable. Très coûteux.*

***Le nickel*** malléable contient du cobalt (0,5 à 2,5). Utilisé pour son aspect brillant et inaltérable.

***Monel*** (Cu + Ni). — Excellente tenue à la vapeur surchauffée, aux basses températures et à de nombreuses corrosions.

***Inconel*** (Ni + Cr + Fe). — Résistant aux corrosions à chaud. Avec le Monel, très utilisés dans les industries chimiques, les raffineries de pétrole, etc. (voir tableau, page 27).

***Les maillechorts*** (Ni + Cu + Zn) sont moins résistants que les alliages ci-dessus, et aussi moins coûteux. Pièces embouties et repoussées, décoration, orfèvrerie, etc.

**Titane.** — Métal cher, *semi-léger* (densité 4,5) à haut point de fusion (1 670 °C) avec de bonnes caractéristiques mécaniques : $R_m$ = 40 à 50 hbar, $R_e$ = 30 à 45 hbar, $A$ = 20 à 30 %. Il résiste bien à de nombreux agents chimiques, mais par contre, *il est très sensible à l'action de l'oxygène, de l'azote et de l'hydrogène*, surtout à haute température.

Par des alliages, et des traitements thermiques, on améliore ses caractéristiques mécaniques. Exemple : l'alliage T A4 M (4 % Al et 4 % Mn) donne pour $R_m$, 90 à 100 hbar.

On l'utilise sous la forme de tôles, tubes et fils, surtout en *aéronautique :* avions supersoniques, engins spatiaux; industries chimiques, électronique, marine, etc.

**Zirconium.** — Métal nouveau et cher, dont les propriétés présentent de grandes analogies avec celles du titane : densité 6,5 et *fusion 1 850 °C* (plus élevées). Ses principaux alliages sont le Zircaloy 2 (Sn : 1,5 %, Fe : 0,15 %, Cr : 0,10 %, Ni : 0,05 %) et le Zircaloy 4, sans nickel.

Métal *transparent aux neutrons*, ce qui le fait apprécier dans les industries nucléaires; utilisé aussi dans les industries chimiques, etc.

***Les matières plastiques.*** — Pour être complète, la liste des matières premières du chaudronnier devrait comporter les matières plastiques qui se chaudronnent comme les métaux, sous la forme de plaques et surtout de tubes. Les plus utilisés sont les polyéthylènes et les chlorures de polyvinyle. On peut les mettre en forme et les souder par des méthodes qui présentent de grandes analogies avec celles utilisées pour les métaux en feuilles.

L'importance de cet ouvrage ne permet pas d'ajouter un chapitre sur cette question.

## TRAITEMENTS MÉCANIQUES ET THERMIQUES DÉCAPAGE DES MÉTAUX ET ALLIAGES

### Traitements mécaniques.

**Écrouissage.** — Les déformations plastiques, exécutées *à froid*, modifient plus ou moins rapidement les caractéristiques mécaniques des métaux et alliages : c'est ce qu'on appelle l'*écrouissage*. Les cristaux sont déformés et orientés dans le sens de la déformation.

On peut observer les effets de l'écrouissage dans une expérience simple. Pour casser un fil d'acier doux, on lui fait subir une succession de flexions alternées au point choisi A (fig. I-12). Après quelques pliages, on peut remarquer que le fil tend à se couder à côté de l'endroit déformé A (II) ce qui indique une *augmentation de la résistance* dans la zone coudée A. Si on continue les pliages successifs en s'opposant à leur déplacement de part et d'autre, on obtient la rupture en A. Le métal, après avoir durci est devenu *fragile*. Presque tous les métaux et alliages sont écrouis plus ou moins rapidement par les opérations de chaudronnage à froid : cintrage, pliage, dressage, emboutissage, rétreinte, planage, etc.

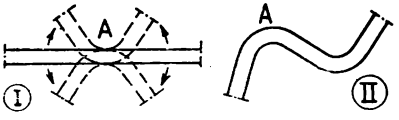



Fig. I-12. — I. Flexions alternées du fil.
II. Coudage en dehors du point A.

Les essais mécaniques sur éprouvettes écrouies indiquent une augmentation de la charge de rupture, de la limite élastique et de la dureté, accompagnée d'une diminution des allongements pour-cent et de la résilience qui dénote la fragilité. Un écrouissage trop prononcé peut provoquer des amorces de cassures, et même des cassures complètes.

Dans la plupart des objets chaudronnés en faible épaisseur, l'*écrouissage est recherché*, surtout pour le cuivre, le laiton, l'aluminium et les duralinox, pour en augmenter la rigidité et la résistance aux déformations.

Mais si l'écrouissage est nécessaire pour l'objet terminé, il devient vite une gêne, puis un obstacle en cours de travail, en rendant la mise en forme pénible et difficile, avant l'apparition de cassures.

## Traitements thermiques.

**Recuit de recristallisation.** — C'est un chauffage dont la température varie avec le métal ou l'alliage (voir tableaux, p. 20 à 27). Appliqué aux pièces écrouies, agit en sens inverse de l'écrouissage : les cristaux déformés par l'écrouissage reprennent un état d'équilibre, $R_e$ et $R_m$ diminuent, $A$ et $K$ augmentent.

Pour mettre en évidence les effets du recuit, prendre quelques pointes de 60 mm ; en chauffer une partie vers 800-850 °C, et laisser refroidir à l'air. Essayer ensuite d'enfoncer, dans du bois dur, les pointes non recuites (fortement écrouies par le tréfilage), puis les pointes recuites.

## Traitement de détente.

Exécuté à plus basse température (580-650 °C pour les aciers non alliés, 720 °C pour les aciers au Cr-Mo, 900 °C pour les inoxydables) ce traitement fait disparaître les *contraintes résiduelles ou tensions internes* laissées par la mise en forme, et *surtout par le soudage*.

On désigne ainsi, les efforts latents qui existent dans une pièce écrouie ou dans un ensemble soudé, mais dont la valeur est insuffisante pour déformer la pièce à froid, ou pour la casser.

Par le chauffage, le métal devient plastique et les contraintes se libèrent, soit par des *déformations* (épaisseurs moyennes), soit par *écoulement plastique* de métal, ce qui supprime les risques de déformations ultérieures (pièces stabilisées) après un usinage éventuel.

**Préchauffage et postchauffage.** — Dans certains aciers faiblement alliés (aciers à haute limite élastique, aciers au chrome, etc.), on observe, par effet de trempe, un durcissement dans les zones de liaison, aux abords de la soudure.

Ces zones, fragiles, présentent souvent des criques ou fissures sous cordon, qui sont des amorces de cassures. Cet effet de trempe est dû à la teneur relativement élevée des éléments d'addition, et au refroidissement rapide (fortes épaisseurs surtout).

On remédie à ces défauts par un préchauffage (entre 100 à 400 °C suivant l'acier) qui réduit les écarts de température, par un maintien en température pendant le soudage, s'il y a lieu, et moins souvent, par un postchauffage qui réduit la vitesse du refroidissement.

Pour cela, on utilise les chalumeaux chauffeurs, ou mieux un chauffage électrique par résistance, et surtout par induction. Les surfaces chauffées sont protégées par des isolants thermiques, ne découvrant que la soudure en cours.

**Trempe.** — La trempe n'est pas souvent utilisée pour augmenter la dureté et la résistance d'une pièce chaudronnée, à part certains alliages légers. C'est, le plus souvent, un traitement d'adoucissement — comparable au recuit, par ses effets — comme pour les inoxydables austémitiques ou ferritiques.

***Appareils pour traitements thermiques.*** — A tous points de vue, c'est le four qui convient le mieux, lorsqu'il est complété par un pyromètre, avec lecture directe et par une régulation automatique de la température : fours à mazout, fours à gaz, fours électriques.

A défaut de four, on peut utiliser les flammes diverses : torches à propane, brûleurs à mazout, chalumeaux aéro-gaz, aéro-acétylénique oxy-gaz, oxy-propane, oxy-acétylénique ordinaire ou multi-flammes, rampes de chauffage par résistance ou par induction.

Tous ces modes de chauffage ont l'inconvénient d'oxyder la surface des tôles, ce qui oblige à décaper après chaque recuit. On supprime cet inconvénient pour les métaux polis (tôles d'acier décapées, inoxydables, cuivre, laiton, etc.) en pratiquant le recuit « en blanc » à l'abri de l'air. Les pièces à recuire sont placées dans une cloche (tôles en rouleaux) ou dans un four-tunnel (bandes) dans lesquels on maintient une atmosphère neutre ou réductrice contrôlée, en légère surpression pour éviter les rentrées d'air. A la sortie du four, les tôles ont conservé leur poli initial.

## Traitements particuliers et décapage.

*Les aciers non alliés* sont recuits par un chauffage au rouge cerise (850 °C) suivi d'un refroidissement lent à l'air. Un chauffage prolongé à haute température, au-dessus de 850 à 900 °C, et un trop grand nombre de recuits ont pour effet un grossissement du grain qui caractérise un métal fragile.

En règle générale, on écrouit les pièces en tôles minces avant leur mise en service pour en augmenter la résistance et la rigidité. Par

contre, les pièces en tôles moyennes et épaisses sont livrées recuites le plus souvent.

Les aciers non alliés se travaillent à chaud entre 800 et 1 200 °C.

Les *aciers inoxydables austénitiques* s'écrouissent très rapidement et sont recuits par un chauffage à 1 100-1 200 °C, suivi d'un refroidissement brusque à l'eau (trempe d'adoucissement). Après chauffage, un décapage est indispensable pour prévenir les corrosions ultérieures et pour améliorer l'aspect de la tôle.

Il existe un grand nombre de bains de décapage ; un des plus employés est composé de :

50 litres d'eau ;
45 litres d'acide chlorhydrique du commerce ;
5 litres d'acide nitrique.

On les travaille à chaud entre 900 et 1 100 °C, mais avec plus de difficultés que les aciers non alliés, surtout en rétreinte.

Pour les petites pièces, après mise en forme, on fait subir au métal une trempe qui améliore la résistance à la corrosion, puis on décape.

Lorsque les dimensions ou la forme de la pièce ne permettent pas le décapage au bain, on polit avec des meules portatives, ou commandées par flexible.

Les aciers *ferritiques* s'écrouissent moins rapidement que les austénitiques ; pour les recuire, on les chauffe à 780-800 °C, puis on les trempe à l'eau.

Le *cuivre* se recuit vers 700-750 °C (rouge cerise naissant). La vitesse de refroidissement est pratiquement sans influence sur les propriétés du cuivre recuit, et on peut indifféremment refroidir rapidement à l'eau ou lentement à l'air.

Il faut veiller à ne pas surchauffer le cuivre non désoxydé. Si on dépasse 900 °C il se produit un phénomène comparable à la surchauffe des aciers au carbone. Le métal qui a subi une modification de structure, se casse et s'égrène sous l'action du marteau ; on dit qu'il est « brûlé ».

Après chaque recuit, il est indispensable de procéder au décapage des tôles pour faire disparaître l'oxyde formé pendant le chauffage. Ce travail est exécuté dans un bain d'acide sulfurique (dérochoir), qui titre de 13 à 20 °Baumé. Après décapage, on rince à l'eau courante et on sèche à la sciure de bois. Les objets en cuivre sont presque toujours livrés écrouis.

Au-dessus de 2 à 3 mm d'épaisseur le cuivre se travaille à chaud, entre 700 et 800 °C.

*Le laiton.* — C'est au rouge sombre (650-700 °C) que se recuit le laiton, au four ou au chalumeau, avec refroidissement lent à l'air. Quelques précautions sont nécessaires, en raison de la fragilité à chaud de cet alliage. La pièce est soutenue et on évite le porte-à-faux ainsi que les manipulations pendant le chauffage.

On décape dans un bain d'acide nitrique et d'acide sulfurique mélangés en parties égales (bain de blanc).

Le laiton ne se travaille pas à chaud et les objets fabriqués sont livrés écrouis.

L'*aluminium* s'écrouit assez difficilement ce qui permet des mises en forme très importantes sans recuit.

Pour le recuire, on chauffe à 400 ± 50 °C et on refroidit à l'eau ou à l'air. A défaut de four avec pyromètre, on utilise un chalumeau et on apprécie la température à l'aide de savon blanc, de suif, ou de sciure de bois (tôles épaisses). Avec le savon ou le suif on trace sur la tôle quelques traits. La flamme est dirigée de préférence sur la face opposée et le chauffage est arrêté lorsque les traits ont pris une teinte bien noire. Si on utilise la sciure de bois on dépose une pincée de sciure sur la pièce chaude. Vers 420 °C il y a dégagement instantané de fumée et apparition de quelques points rouges.

Le décapage ne s'impose pas après chaque recuit mais il est nécessaire avant le planage. On l'exécute de la façon suivante : immersion dans un bain de soude caustique à 10 % chauffé à 70 °C, rinçage à l'eau courante, immersion dans un bain d'acide nitrique à 10 %, rinçage soigné et séchage à la sciure de bois.

L'aluminium est très malléable à chaud vers 400 °C. Tous les objets chaudronnés sont livrés écrouis.

Le *duralumin* est fourni à l'état *normal* (trempé), *recuit*, ou *dur* (trempé et écroui). L'état normal, le plus courant, est obtenu par une trempe à l'eau à 490 ± 5 °C. Ce traitement est appelé recuit-trempe parce que immédiatement après la trempe, le métal est adouci et se prête bien au chaudronnage. Cet état est instable à la température ambiante et quelques heures après la trempe, le duralumin devient dur et résistant. Ce phénomène de *vieillissement* ou *maturation* se poursuit et ce n'est que quatre jours après, que le métal atteint ses propriétés mécaniques maximales. On le travaille sur trempe fraîche mais il faut le retremper toutes les 2 heures au plus, à moins qu'un écrouissage prononcé n'ait obligé à le faire plus tôt.

Le recuit s'opère à 400 ± 20 °C et n'est effectif que si le refroidissement est lent (50 °C par heure) ; c'est le recuit lent. Ces expressions sont impropres. Il n'y a ni recuit-trempe ni recuit lent, il y a la trempe et le recuit. Ce dernier traitement doit toujours être suivi d'une trempe.

Pour les mises en forme importantes, à froid, on travaille sur métal recuit sauf pour la dernière opération qui doit être nécessairement exécutée sur trempe fraîche.

Seuls, les fours permettent de traiter convenablement le duralumin. On rencontre les fours électriques par résistance à circulation d'air et les fours à bain de sels. Comme sels on emploie le nitrate de sodium ou un mélange en parties égales de nitrate de potassium et de nitrite de sodium. Le bain est chauffé au gaz, au mazout, électriquement, etc. et possède une régulation automatique de la température. Ces fours sont les plus répandus et conviennent parfaitement pour la trempe. Par contre, ils ne permettent pas le recuit, et ils peuvent provoquer de graves accidents (explosions) par surchauffe ou par chute accidentelle de corps combustibles dans le bain (charbon, huile, bois, magnésium).

Les fours à circulation d'air sont chauffés par des résistances électriques ; ils chauffent moins vite, moins régulièrement que les précédents, mais ils sont tout indiqués pour le recuit.

On conseille, pour le décapage, le bain d'acide sulfo-chromique :

| | |
|---|---|
| Acide sulfurique . . . . | 15 litres |
| Acide chromique . . . . | 5 kg |
| Eau. . . . . | 85 litres |

Les tôles décapées sont rincées soigneusement et séchées dans la sciure.

Cassant à froid, le duralumin se travaille bien à chaud vers 400 °C, mais il redevient très fragile vers 450 °C. *A 520* °C, *il est « brûlé » et inutilisable.* Toute pièce travaillée à chaud doit être trempée avant mise en service.

Les *duralinox* (AG) s'écrouissent rapidement. Pour les recuire, on les chauffe vers 400 °C, puis on les refroidit rapidement à l'eau. Le chauffage au four est celui qui donne les meilleurs résultats mais le chalumeau peut suffire pour les petites surfaces. On décape comme l'aluminium et les produits finis sont écrouis.

On améliore la résistance des alliages légers à l'oxydation et à certaines corrosions, par une *protection anodique.* C'est une oxydation superficielle provoquée par électrolyse — les pièces étant fixées à l'anode — qui protège le métal sous-jacent et qui, de plus, a l'avantage d'améliorer l'accrochage des colorants, des peintures ou vernis.

Les *alliages de magnésium* sont surtout chaudronnés à chaud vers 300 °C. Ils se comportent un peu comme le duralumin. On peut les recuire par un chauffage à 300 °C environ pendant 1 heure.

Le *plomb* s'écrouit très peu et ne se recuit pas. On le chauffe vers 200 °C pour faciliter les mises en forme difficiles.

Le *zinc* est cassant à la température ambiante surtout l'hiver. Pour le travailler, on le chauffe entre 100 et 150 °C, température où il atteint son maximum de malléabilité. A partir de 200 °C sa fragilité augmente avec la température. Sa mise en forme reste limitée et on le chaudronne peu.

Le *nickel et ses alliages* — le Monel surtout — s'écrouissent rapidement et leur mise en forme exige de nombreux recuits dans des fours entre 750 et 900 °C pour le nickel et le Monel et vers 1 000 °C pour l'Inconel.

Il est conseillé de décaper après chaque recuit dans une solution contenant 8 à 10 % (en poids) d'acide sulfurique à 66 °Baumé.

Le *titane* et le *zirconium*, et leurs alliages, exigent des méthodes de travail particulières. Leur grande élasticité est une gêne dans la mise en forme, que l'on facilite par un chauffage du métal et des outillages, vers 300-400 °C.

Les traitements thermiques ne peuvent être exécutés que dans des fours, à l'abri de l'air.

## L'ATELIER ET L'OUTILLAGE GÉNÉRAL

L'installation est très variable suivant la spécialité, depuis l'atelier de l'artisan jusqu'aux chaînes modernes de fabrication.

Comme pour tous les ateliers, il y a intérêt à disposer d'un local vaste et bien éclairé au sol cimenté avec des allées bien dégagées et des couleurs fonctionnelles dont l'usage se généralise de plus en plus.

Quelle que soit son importance, un atelier comprend :

— les magasins ;
— l'outillage manuel et mécanique ;
— les appareils de levage et de manutention ;
— les installations accessoires.

**Les magasins.** — Une large place doit être prévue pour les magasins aux matières premières avec accès facile de l'extérieur pour l'approvisionnement et de l'intérieur pour le débit.

Les tôles minces sont généralement placées sur des supports horizontaux ; les tôles épaisses à même le sol à plat, ou verticalement contre un support. Les tôles d'alliages légers, de cuivre, de laiton sont rangées dans des casiers verticaux *en bois.*

On classe les profilés et les tubes par catégories et sections sur des chevalets ou debout contre un mur.

De plus, on doit prévoir de nombreux casiers et tiroirs pour les boulons, les rivets, les métaux et produits d'apport pour les soudures, les joints divers, etc.

**L'atelier proprement dit.** — La disposition de l'outillage et des machines est étudiée en vue d'éviter toute manœuvre inutile. En règle générale, on s'inspire du cycle des différentes opérations. A la sortie du magasin — ou dans le magasin même — les cisailles diverses, les machines d'oxy-coupage, les scies, les tronçonneuses, etc.

Ensuite viennent les machines d'usinage à plat : perceuses, poinçonneuses, cisailles circulaires, grignoteuses, etc. Les plieuses, les cintreuses, les machines et outils de mise en forme, les presses, les fours, les établis et les tables de travail sont installés à la suite.

Enfin le chantier ou l'aire de montage et d'assemblage sont complétés par les postes de soudage et les machines de finition.

***Outillage manuel général.*** — Dans les chapitres qui suivent on étudiera, avec chaque opération, l'outillage spécial correspondant.

Le travail à la main se fait sur des *établis muraux* garnis de quelques étaux et surtout sur des *tables de travail* placées au centre de l'atelier.

Ces tables sont percées, sur les bords, de trous en forme de troncs de pyramide, ou mieux tronconiques, pour recevoir les outils et tas divers dits « d'établi » et elles sont bordées de cornières pour le travail des aciers. Les bordures ne sont pas conseillées pour le travail des métaux polis : cuivre, laiton et surtout pour l'aluminium qui se raye très facilement.

Parmi les tas d'établi les plus utilisés, on peut citer les *tas en fer à cheval*, les *tas ronds*, les *tas rectangulaires* et les *tas à boule* (fig. I-13) d'un diamètre de 20 à 60 mm environ. Sur l'établi on utilise aussi les *bigornes* et *bigorneaux* divers (fig. I-14).

Les *chevalets*, les *barres à plier et à river*, les *barres supports d'outils* divers, etc., sont calés dans des billots enterrés et scellés au sol (fig. I-16).

On monte sur *billots mobiles*, les *bigornes de forge*, les *tas à planer*

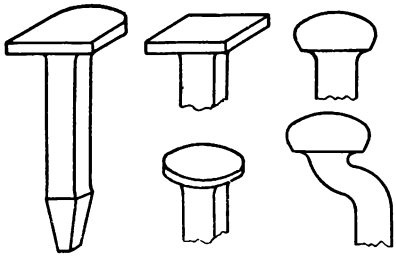


Fig. I-13. — Tas divers.

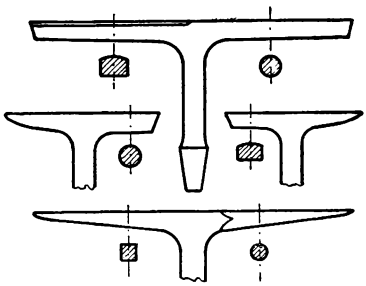


Fig. I-14. — Bigornes et bigorneaux.

et les outils divers *à pied* (fig. I-15). Pour ceux-ci, les billots en bois sont avantageusement remplacés par les billots en fonte. Les outils les plus utilisés sont les tas ronds et ovales, qui sont plats ou bombés, à boule, en fer à cheval, les pieds de chèvre (fig. I-15).

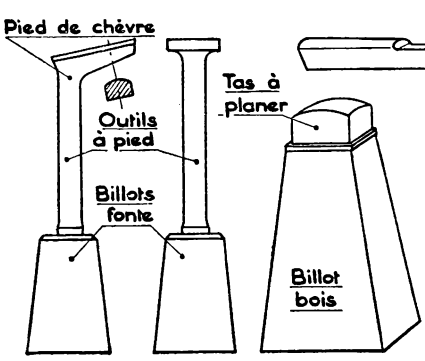



Fig. I-15.

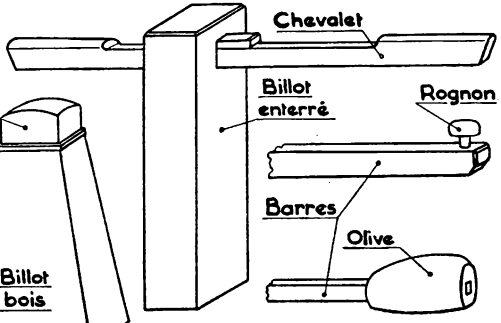



Fig. I-16.

Tous ces tas, plus massifs et plus solides que les tas d'établis, conviennent pour les plus gros travaux ; leur diamètre varie de 50 à 120 mm. Avec leur extrémité en forme de tronc de pyramide, ces outils tiennent mal dans les billots ou logements en bois, malgré les calages par coins souvent mal préparés. Sur l'outillage existant, on peut remplacer — par oxy-coupage et soudage à l'arc — les troncs

de pyramides, par des troncs de cône, que l'on loge dans des bagues tronconiques de même conicité ; ces bagues peuvent être montées soit sur des établis, soit sur des supports (fig. I-17). On peut de cette

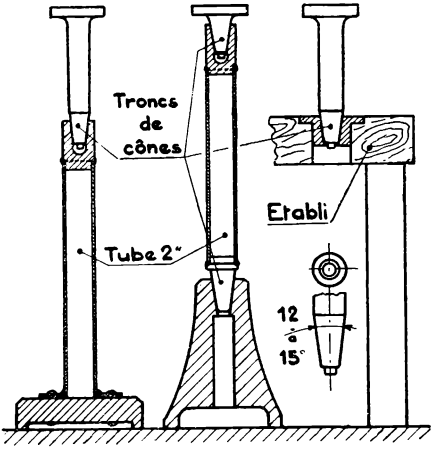



Fig. I-17. — Outils à queue tronconique.

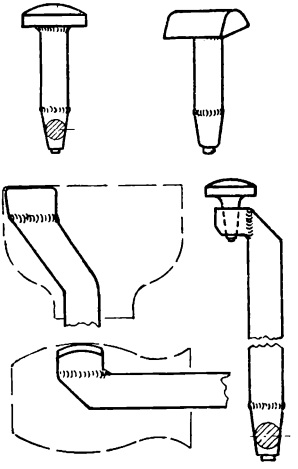


Fig. I-18. — Outils soudés.

façon supprimer les outils massifs en acier dur, en utilisant des rognons (acier traité), que l'on monte sur des supports, ou en bout de barres en acier non allié (fig. I-16 à I-18).

Le soudage à l'arc permet de fabriquer rapidement, et à peu de frais, des outils classiques ou spéciaux, la tête de l'outil, seule, étant en acier de qualité (fig. I-18).

Pour éviter le désordre, on range les outils sur des panoplies murales où chaque outil a sa silhouette dessinée à la peinture.

Également au mur, au-dessus des établis les marteaux et maillets sont placés, par catégories, sur des râteliers (fig. I-19).

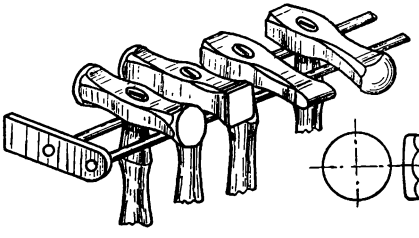


Fig. I-19. — Râtelier à marteaux.

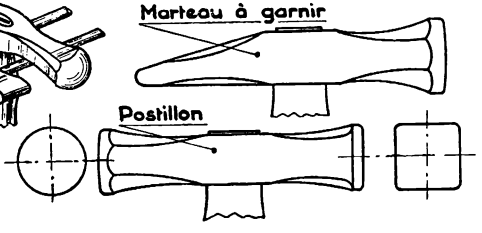



Fig. I-20.

Les marteaux ordinaires du chaudronnier sont les marteaux à garnir (fig. I-20) dont les plus courants ont une table de 24 à 40 mm et un poids variant de 0,300 à 0,900 kg. Avec ces marteaux seulement, on frappe sur les outils à main (burins, broches, pointeaux, etc.). Aucun autre marteau ne doit être utilisé, à cet effet, pour conserver une surface de frappe propre.

Un marteau très employé également est le postillon avec une tête ronde et une tête carrée (fig. I-20). Pour le travail des métaux non ferreux, on polit les tables des marteaux, et il est conseillé de constituer une série de marteaux et outils spécialement réservés pour le travail des alliages légers.

La figure I-21 indique la bonne manière d'emmancher un marteau. Un emmanchement à épaulement (fig. I-21) est à éviter, car il n'est jamais serré.

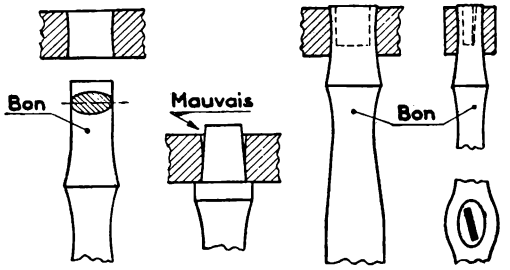



Fig. I-21. — Emmanchement d'un marteau.

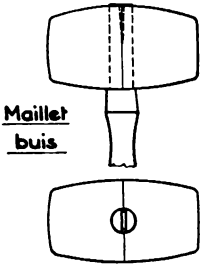



Fig. I-22.

Les maillets ordinaires ont généralement la forme baril (fig. I-22) (⌀ 40 à 80 mm) avec une tête presque plate et une tête légèrement bombée. A l'inverse des marteaux l'emmanchement à épaulement n'est pas nuisible pour un maillet. Le manche ne doit pas forcer et le coin est toujours disposé perpendiculairement aux fibres du maillet (fig. I-22) ; dans le sens des fibres du bois on risquerait de le faire éclater.

Les marbres à tracer sont réservés strictement au traçage et ne doivent pas être utilisés pour le dressage, le planage et toute autre opération de martelage.

Le découpage au burin est exécuté sur des marbres hors d'usage ou sur des tas spéciaux, mais jamais sur un marbre à planer ou sur n'importe quel tas ou bigorne.

## Appareils de levage et de manutention.

Les cadences élevées atteintes par les machines modernes exigent des installations de levage et de manutention nombreuses et parfaitement étudiées, afin de réduire, le plus possible, les temps morts dus au transfert des pièces entre les différents postes de travail.

*Ponts roulants* pour grosses charges ; couvrent toute la surface de l'atelier et parfois des magasins. Commande d'une cabine placée sous le pont (fig. I-23), parfois, avec une planchette à boutons-poussoirs, manœuvrée du sol.

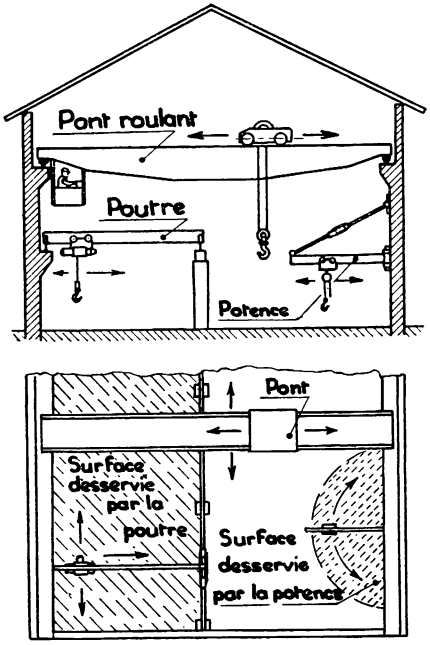



Fig. I-23.

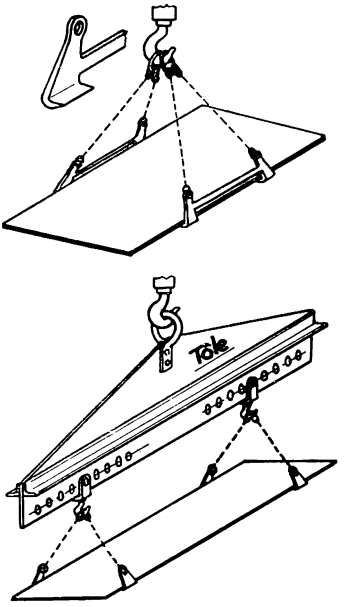



Fig. I-24. — Levage des tôles.

*Petits ponts roulants* ou *poutre roulante* (fig. I-23) en fer I (charges moyennes) couvrant une partie de l'atelier ; commande par planchette de *boutons-poussoirs*, pendue sous le pont, à hauteur de manœuvre.

*Poutre en fer* I *avec trolley* commandé par chaînes, ou mieux par un moteur et commande par boutons-poussoirs (faibles charges).

*Potences* (fig. I-23) pour desservir une ou plusieurs machines.

*Mono-rails :* trolleys électriques ou à chaînes, sur poutre en fer I ; alimentent des postes de travail en ligne droite, courbe, ou fermée. Avec tous ces appareils, les tôles sont levées avec des crochets spéciaux (fig. I-24), ou avec des ventouses à dépression, ou des électro-aimants.

*Camions et camionnettes* (plateaux) chargés par les ponts, desservent les ateliers étendus ou éloignés.

*Chariots transporteurs :* petites pièces logées dans des bacs montés sur pieds (fig. I-27) ; bacs soulevés, transportés et reposés par des chariots électriques ou Diesel. Certains chariots dits élévateurs permettent d'empiler les bacs et containers (fig. I-27).

*Chemins de roulements à rouleaux* (fig. I-25) légèrement inclinés, sur lesquels les pièces se déplacent par gravité ; parfois rouleaux en rotation.

*Tapis transporteurs ou tapis roulants* (fig. I-25).

*Tapis magnétiques élévateurs* (fig. I-26) pour petites pièces.

*Billes de manutention* logées sur les tables des machines, ou montées

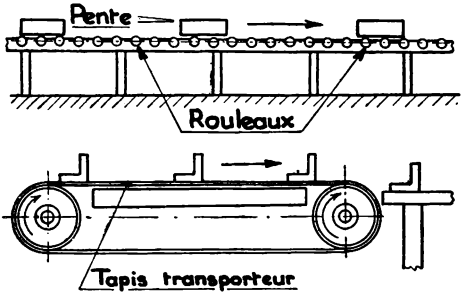



Fig. I-25.

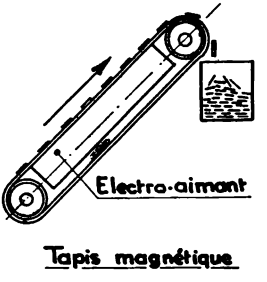



Fig. I-26.

sur chandelles (fig. I-28) devant la machine à desservir ; permettent de déplacer les tôles lourdes sans effort.

*Machines transfert :* ensembles très complexes qui assurent, en synchronisme avec les presses, l'alimentation automatique d'une série

de machines : mise en position de travail, verrouillage, déplacements, retournement (s'il y a lieu), etc., sans intervention manuelle (pour très grandes séries).

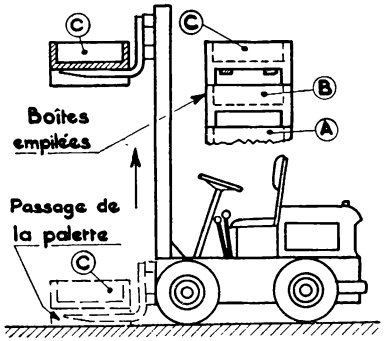



Fig. I-27. — Chariot élévateur.

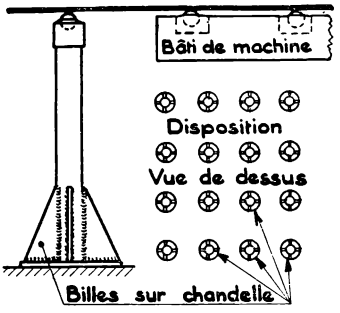



Fig. I-28. — Billes de manutention.

## Installations accessoires.

*Décapage et soudage à l'étain* dans un local extérieur à l'atelier et aux magasins ; sinon, aspiration efficace : hygiène du personnel, attaque de l'outillage et des matières premières.

*Postes de soudage à l'arc : écrans* de protection contre les radiations émises par l'arc électrique. *Aspiration* indispensable si l'atelier est petit et fermé.

*Installations électriques :* mise à la terre des postes de soudage, et de toutes les machines alimentées avec une tension élevée ; machines portatives alimentées en 24 V.

*Air comprimé :* compresseurs et réservoirs hors de l'atelier.

*Centrales de distribution d'oxygène et d'acétylène* ou réservoirs à gaz liquéfiés (oxygène, argon), le tout à l'extérieur.

*Conduites de distribution* des gaz et liquides, aériennes ou en caniveaux recouverts de dalles mobiles ; tuyauteries peintes aux couleurs normalisées.

*Chutes de tôles* recueillies et classées par nature dans des bacs ou boîtes, afin de faciliter l'enlèvement et de diminuer les risques d'accidents.

*Services de peinture, d'emballage et d'expédition* des produits finis.

*Vestiaires, douches, infirmerie,* etc.

CHAPITRE II

# TRAVAIL DES TOLES A PLAT

## LE TRAÇAGE

En chaudronnerie, le traçage occupe une place très importante, mais dans la fabrication on l'élimine le plus possible. Néanmoins, le traçage est indispensable à l'échelon préparation et dans les travaux unitaires ou de petite série, encore très nombreux.

Ici le traçage n'est étudié que du point de vue outillage.

**Outillage courant.** — Le chaudronnier trace ses épures et ses développés sur des tôles qui ne sont pas toujours parfaitement planes. On évite le dressage — opération coûteuse et souvent difficile — chaque fois qu'il ne s'impose pas (1). Le marbre dressé est préférable mais il n'est utilisable que pour les tracés de petites et moyennes dimensions. Dans les ateliers où l'on fabrique des pièces de grandes dimensions, on dispose de tables de traçage formées de marbres juxtaposés ou à défaut de tôles épaisses dressées le mieux possible et calées sur des tréteaux. En carrosserie automobile, on fait le « grand plan » sur des tôles fixées sur un châssis vertical et en aviation on préfère de grandes tables basses recouvertes de tôles d'alliages légers. L'atelier de traçage est souvent indépendant de l'atelier de fabrication.

Les marbres et tôles sont blanchis avec du blanc de Meudon délayé à l'eau, auquel on ajoute un peu de colle pour en augmenter l'adhérence ; on utilise aussi des peintures blanches ou de couleur (sanguine).

Les lignes droites sont tracées à la règle plate mince et large pour

(1) Voir le dressage.

Dans l'ordre des opérations, le dressage occupe la première place et il semblerait logique que ce chapitre fût traité avant le traçage. Mais, comme il est expliqué plus loin, le dressage se range parmi les opérations de mise en forme.

bien appliquer sur les tôles mal dressées. Lorsque l'épure dépasse 3 ou 4 m, on se sert du cordeau fin pour « battre » les traits. Le cordeau enduit d'une poudre de couleur et bien tendu sur les tôles est soulevé perpendiculairement suivant une équerre (fig. II-1), puis

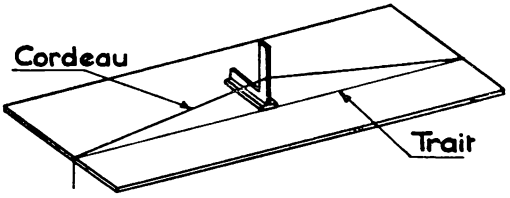



Fig. II-1. — Trait « battu » au cordeau.

lâché. En frappant la tôle il marque le trait. Cette méthode donne un trait trop large pour les tracés précis. Pour augmenter la précision

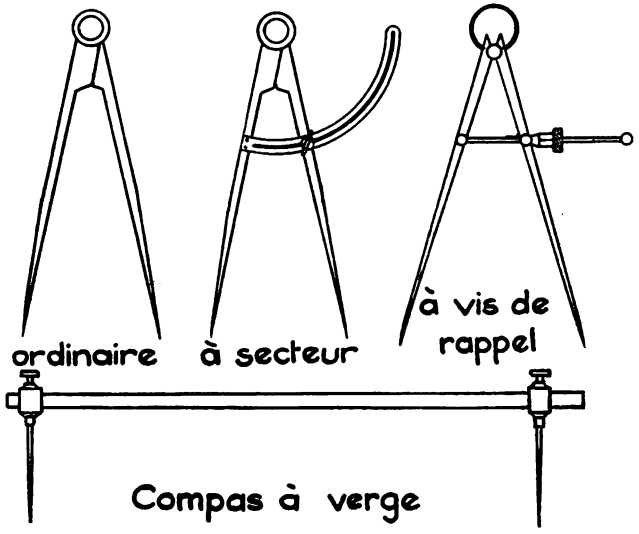



Fig. II-2. — Compas.

on tend bien le cordeau et, à la pointe à tracer, on trace de place en place d'un côté du cordeau quelques traits repères que l'on joint ensuite avec une grande règle plate (1).

(1) Voir *Cours de traçage des métaux en feuilles*, par G. COTANT (Dunod).

Avec des réglettes souples graduées de 0,50 m à 2 m, on porte les mesures de longueur.

Les perpendiculaires sont construites avec des équerres, et plus souvent au compas dont les pointes sont affûtées aussi finement que possible ainsi que les pointes à tracer.

On utilise les compas ordinaires, les compas à secteur, et les compas à vis de rappel (fig. II-2). Ces derniers sont les plus pratiques : avec l'écrou débrayable on règle l'ouverture rapidement et d'une façon approximative, puis, à l'aide de la vis à pas très fin, on procède au réglage définitif avec toute la précision désirable.

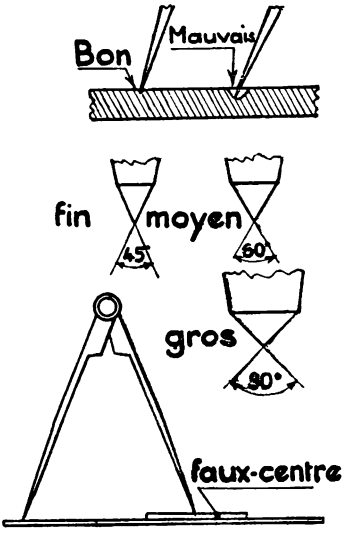



Fig. II-3.

Pour les grandes longueurs, on emploie les compas à verge montés sur des règles de 1 à 4 m de longueur. Pour tracer les courbes quelconques ou les arcs de cercle de grand rayon, on emploie des règles ou réglettes souples, dont l'épaisseur augmente avec le rayon de courbure et que l'on cintre par déformation élastique sur le tracé. En carrosserie et en aviation, on utilise également des joncs en matière plastique qui sont maintenus au rayon de courbure sur le tracé, par des poids mobiles (1).

On ne doit jamais tracer un arc de cercle sur acier, sans marquer le centre d'un léger coup de pointeau fin. Dans un coup de pointeau large et profond, la pointe du compas peut se déplacer et ne pas être au centre (fig. II-3).

Avec un pointeau moyen on marque les contours et avec un gros pointeau on pointe les centres des trous à percer ou à poinçonner.

Sur les métaux autres que l'acier on n'utilise que rarement la pointe à tracer et jamais le pointeau. Les rayures laissées par ces outils sont préjudiciables au bon aspect de l'objet terminé, et surtout risquent d'amorcer des cassures (duralumin, zinc, etc.), ou une oxydation locale en enlevant la couche de protection des tôles étamées, galvanisées ou plombées.

(1) Voir *Cours de traçage des métaux en feuilles*, par G. COTANT (Dunod).

Quoique moins précis que la pointe à tracer, le crayon très dur bien affûté est préférable. On peut tracer à la pointe, le cuivre et le laiton, mais sans appuyer.

Les circonférences sont tracées avec un faux centre (fig. II-3) pour supprimer les coups de pointeau.

**Outillage spécial.** — ***Traçage des tôles.*** — Pour une pièce unique le tracé est fait directement sur la tôle d'exécution ; s'il y a un petit nombre de pièces on usine soigneusement la première et on l'utilise comme calibre.

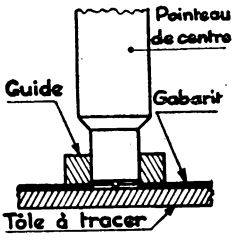


Fig. II-4. — Pointeau de centre.

Dès qu'il s'agit d'une petite série on fait un gabarit en tôle mince qui est rapidement ajusté et qui porte bien sur les tôles mal dressées. Les trous sont percés à un petit diamètre (3 à 4 mm) pour faciliter le centrage du coup de pointeau. On peut aussi river ou souder des cheminées ou bandes de renfort sur la ligne de trous pour guider le pointeau de centre (fig. II-4) qui supprime le centrage.

Sur le gabarit, le traceur indique par des signes conventionnels, et variables avec les usines, tout ce qui est nécessaire à l'ouvrier « reproducteur » pour reporter le tracé sur les tôles (fig. II-5).

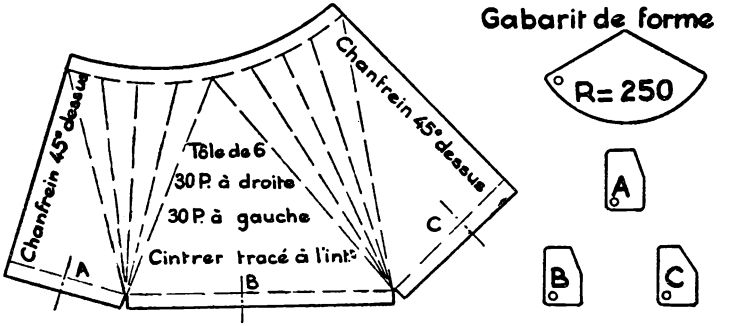


Fig. II-5. — Gabarits de traçage et de mise en forme.

Le gabarit de traçage est accompagné des calibres de mise en forme (cintrage, pliage, emboutissage, etc.). Dans les séries importantes, on supprime le traçage chaque fois que c'est possible, en utilisant des montages sur les machines de découpage, les outils de presse, les machines d'oxy-coupage et les gabarits de perçage.

***Traçage des profilés.*** — Il est indispensable que les profilés soient trusquinés pour tracer les lignes de trous. Les trusquins sont des outils simples en tôle de 2 à 3 mm ayant la forme du profilé et portant des encoches pour guider la pointe à tracer (fig. II-6).

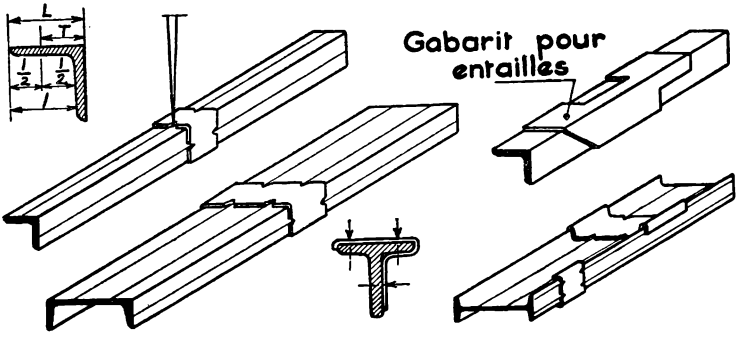



Fig. II-6. — Trusquinage des profilés.

Les cornières et fers en U sont trusquinés en partant du talon. Les calibres de longueur sont généralement des bandes de feuillard dans lesquelles on perce des trous de petit diamètre pour tracer les trous sur les lignes de trusquinage. Les coupes et les entailles sont tracées avec des gabarits de largeur (fig. II-6).

***Traçage des tubes.*** — *Trusquinage.* — Pour les petites longueurs, on utilise une cornière dont on a dressé les ailes (fig. II-7). Cet outil ne convient pas pour les grands tubes qui ne sont jamais parfaitement droits. A l'aide d'une équerre à niveau (fig. II-8) on trace, au point de tangence, des points d'une même génératrice.

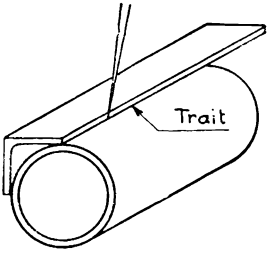



Fig. II-7.

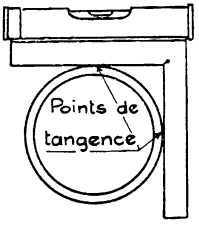



Fig. II-8.

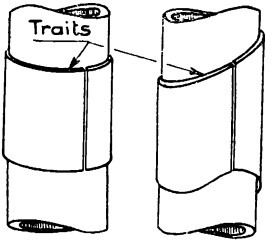



Fig. II-9.

*Gabarits de coupe.* — Les coupes d'équerre sont tracées avec un manchon en tôle mince (fig. II-9) ou simplement avec une bande de tôle roulée. Un outil analogue permet de tracer les coupes biaises ou les piquages. Dans ce cas, si l'angle mesure 90°, on fait l'épure de l'intersection sur le diamètre intérieur (fig. II-10). Lorsque le piquage est oblique, on fait l'épure par moitié sur le diamètre intérieur et par moitié sur le diamètre extérieur (fig. II-11).

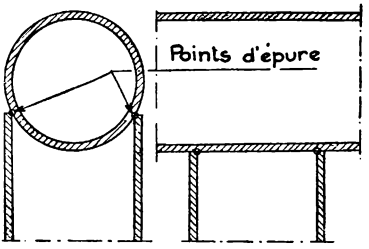



Fig. II-10.

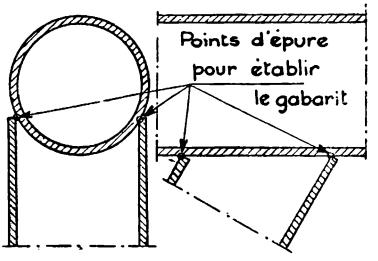



Fig. II-11.

***Traçage des pièces de forme.*** — Pour un tout petit nombre de pièces formées on peut tracer en l'air sur le marbre à l'aide de trusquins, de cubes de traçage, d'équerres, etc.

Dès que la série en vaut la peine on fait des calibres qui sont souvent des pièces formées dans lesquelles s'emboîtent les pièces à tracer. De petits trous percés dans le gabarit permettent de tracer les trous comme avec des gabarits plans. Ces outils spéciaux sont souvent exécutés par le traceur.

On peut aussi tracer sur la maquette ou le montage de mise en forme ou mieux encore découper, sans tracer, sur des machines ou des montages spéciaux.

# LE DÉCOUPAGE

L'usinage des tôles, à plat, aux formes imposées par le traçage, est obtenu par des opérations très variées, que l'on groupe sous le terme général de *découpage* et que l'on peut classer en trois grandes catégories :

*Cisaillage :* sous des formes diverses : cisaillage, poinçonnage, grignotage, grugeage, découpage à la presse.

*Découpage par enlèvement de copeaux :* sciage, tronçonnage à la meule, toupillage, auxquels on peut ajouter : perçage, meulage.

*Découpages thermiques : oxy-coupage, plasma.*

## LE CISAILLAGE

**Principe.** — Deux lames d'acier à angle vif (80 à 90°) séparent la tôle suivant leur plan de frottement, par leur déplacement relatif (fig. II-12).

*1er temps :* les lames pénètrent peu profondément dans la tôle : fibres superficielles coupées, et fibres internes légèrement déformées.

*2e temps :* l'effort augmente, les fibres superficielles sont cisaillées, et les fibres internes, plus déformées, sont soumises à un effort de traction.

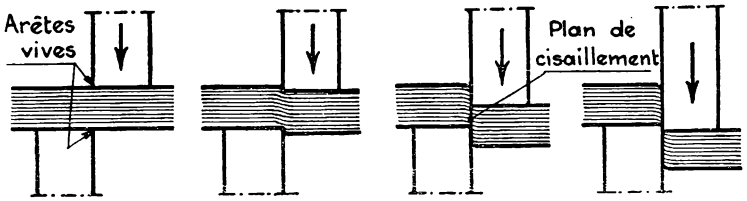



Fig. II-12. — Principe du cisaillage.

*3e temps :* des amorces de cassures apparaissent au point de contact des arêtes de coupe, puis la rupture, par traction, se propage dans toute l'épaisseur.

*Même principe*, le grignotage (mais généralement suivant un profil fermé) dans les *poinçonnages* et le *découpage* à la presse.

## Différents types de cisailles.

### *Cisailles pour coupes droites à mouvement circulaire.*

***Cisailles à main.*** — L'effort appliqué sur les poignées est augmenté par le levier articulé autour de l'axe O (fig. II-13).

Pour exécuter les différentes coupes, on utilise des lames de formes variées : cisailles à portées planes pour coupes droites (fig. II-14), cisailles universelles (fig. II-15) pour coupes circulaires, cisailles mixtes avec une lame droite et une lame de cisaille universelle (fig. II-13), lames coudées ou cintrées (coupe-trous).

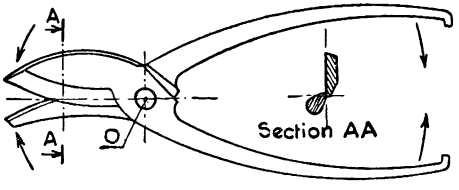



Fig. II-13. — Cisailles mixtes.

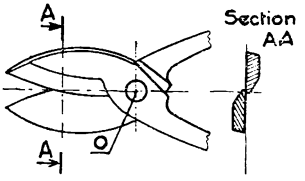



Fig. II-14.
Cisailles à portées planes.

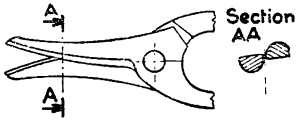



Fig. II-15. — Cisailles universelles.

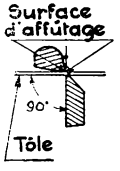



Fig. II-16.

Les lames doivent être affûtées souvent pour présenter une arête de coupe bien nette. La surface d'affûtage est indiquée sur la figure II-16. Sur les faces de frottement, l'affûtage ne peut être exécuté correctement qu'à la machine à surfacer. A noter que les faces d'affûtage ne sont pas droites, mais courbes, pour que l'angle formé par les 2 lames soit le même, quelle que soit l'ouverture des lames.

Pour éviter les bavures et le passage de la tôle entre les lames,

la cisaille doit être tenue de telle sorte *que le plan passant par les faces de frottement soit perpendiculaire à la tôle* (fig. II-16).

Avec une cisaille mixte, on coupe en ligne droite comme l'indique la figure II-17. La lame droite en prenant appui sur la coupe maintient la cisaille en direction.

Pour les coupes circulaires, la cisaille est orientée en sens inverse des coupes droites (fig. II-18) pour que la lame supérieure ne cache pas le tracé.

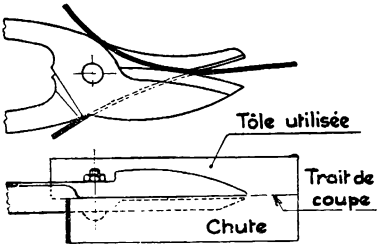



Fig. II-17. — Coupe en ligne droite.

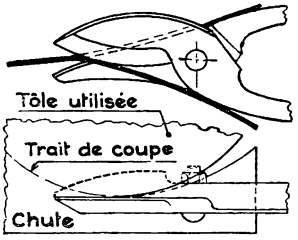



Fig. II-18.
Coupe sur tracé courbe.

Avec les cisailles à main on ne coupe guère au-dessus de 1,2 mm d'épaisseur en acier non allié, même avec des allonges en tubes dans les poignées.

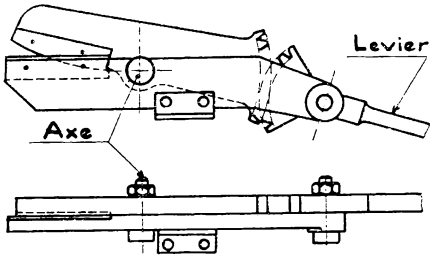



Fig. II-19. — Cisaille d'établi.

***Cisailles d'établi.*** — Ces outils qui furent longtemps des cisailles droites de grandes dimensions (longueur totale 1 m environ) ont évolué vers des modèles plus pratiques et plus maniables (fig. II-19) à lames rapportées. Épaisseur maximum à couper 2 à 3 mm en acier non allié.

***Cisailles à balancier.*** — Les lames qui peuvent atteindre 1 m de longueur sont situées entre l'articulation et le levier (fig. II-20).

La lame inférieure montée sur le bâti est droite et fixe pendant le travail. C'est la lame supérieure qui se déplace. Articulé autour de

l'axe et équilibré par un contrepoids, le balancier porte la lame supérieure qui est cintrée pour que l'angle formé par les deux lames soit constant dans toutes les positions du balancier.

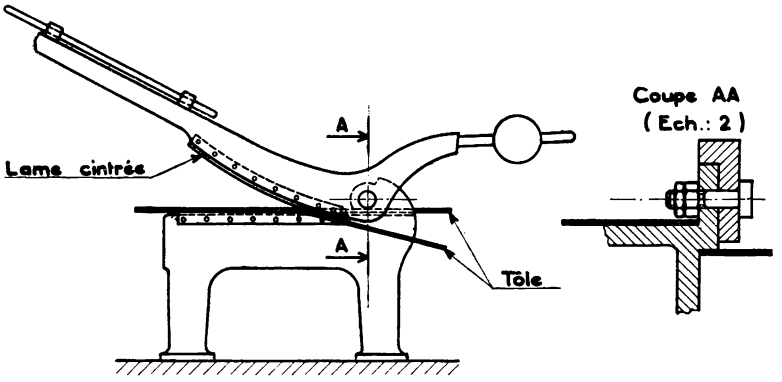



Fig. II-20. — Cisaille à balancier.

Comme dans toutes les cisailles à lames rapportées, un logement est prévu pour les lames afin que les boulons de montage ne supportent pas l'effort de cisaillement (fig. II-22). On règle le serrage suivant le plan de frottement par un calage au papier.

L'axe est disposé de telle sorte qu'il est possible de couper les tôles sans limite de dimensions, avec peu de déformation ; l'une des tôles reste plane.

***Cisailles à levier.*** — On retrouve la même disposition que dans les cisailles à balancier, mais avec une démultiplication, et des lames plus courtes (150 à 200 mm environ). Surtout pour fers plats, ou bandes.

***Cisailles-guillotines*** (lames droites). — Ce sont les cisailles à tôle par excellence, celles qui donnent les meilleurs résultats : coupes parfaitement droites, avec le minimum de déformations. La longueur des lames varie de 1 à 6 m.

Elles présentent de grandes analogies avec les presses en général, et avec les presses plieuses, en particulier (voir p. 127 et 196, avantages et inconvénients des presses mécaniques et hydrauliques).

La commande mécanique est surtout utilisée dans les petits modèles, où le vilebrequin et les bielles, sont placés sous le coulisseau ; par contre, ils sont au-dessus, dans les grosses machines (fig. II-21).

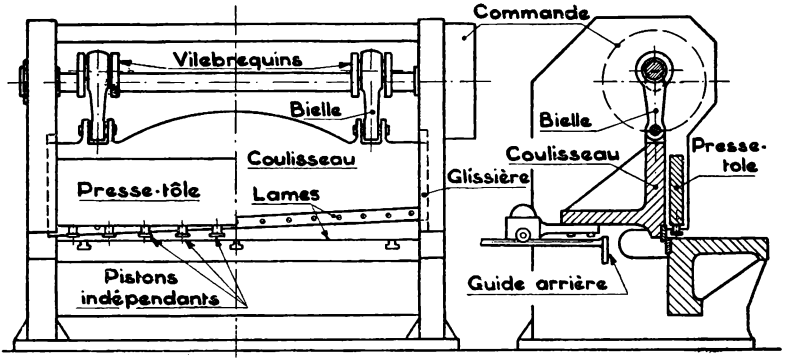



Fig. II-21. — Cisaille-guillotine.
Le presse-tôle est demi-coupé sur la vue de face.

Lorsque la commande est hydraulique, les deux bielles sont remplacées par deux vérins à huile, ce qui exige un dispositif d'équilibrage des efforts sur les vérins. En effet, la charge est constamment variable, sur chaque vérin, durant une coupe sur toute la longueur des lames. Généralement les vérins sont accouplés mécaniquement par un arbre, de gros diamètre (que l'on pourrait appeler arbre de non-torsion) et un système de bielles qui rendent leur action solidaire. Dans d'autres modèles, une correction automatique hydraulique répartit la pression dans les deux vérins, en fonction de la position de la résultante de l'effort.

En commande mécanique, comme en hydraulique, on peut travailler coup par coup, ou à la volée.

Les lames sont encastrées (fig. II-22), et elles ont un angle de coupe de 90°, parfois 80° pour les tôles minces.

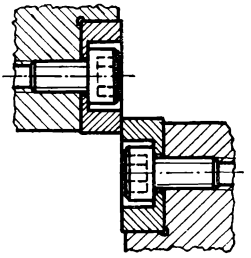


Fig. II-22. — Lames de cisaille.

La lame inférieure est montée sur la table et la lame supérieure sur le coulisseau. Les lames affûtées à 90° peuvent, par retournement, travailler sur leurs quatre arêtes et, pour toutes les lames, l'affûtage ne peut être exécuté que sur des machines spéciales.

L'angle formé par les deux lames, 2 à 3°, peut, dans certaines cisailles, être réglé suivant l'épaisseur à couper : 0°30 pour les tôles minces, et jusqu'à 3° pour les tôles épaisses.

Entre les lames, le jeu est de l'ordre de 0,06 mm par millimètre d'épaisseur à couper, et il est pratiquement nul pour les tôles minces. L'angle formé par les lames, et le jeu, sont réglables rapidement de l'avant de la machine, dans les cisailles perfectionnées.

Un presse-tôle (enlevé sur la moitié de droite de la fig. II-21) commandé par une came ou par le coulisseau lui-même, maintient la tôle par l'intermédiaire de ressorts pendant toute la durée de la coupe. Les presse-tôles à vérins à huile, indépendants, donnent un serrage plus énergique et plus uniforme.

ÉQUIPEMENTS ACCESSOIRES. — *Billes de manutention* dans la table (fig. II-24) et sur chandelles (voir fig. I-29) pour tôles lourdes. Parfois, ces billes s'effacent dans la table, au moment de la coupe, pour éviter les déformations.

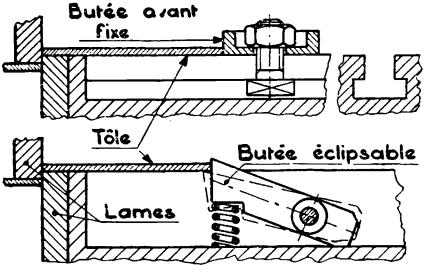



Fig. II-23. — Butées.

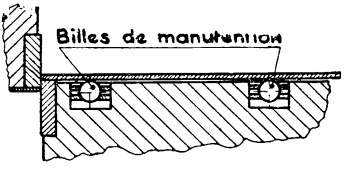



Fig. II-24.

RÈGLE D'ÉQUERRAGE ET BUTÉES AVANT. — La règle d'équerrage qui peut être graduée pour coupes unitaires, permet le montage de butées fixes ou éclipsables dans une rainure en T (fig. II-23).

Les mêmes butées peuvent se monter sur la table ou sur deux consoles qui sont aussi rainurées; on peut également fixer des règles parallèles ou obliques aux lames ainsi que des montages (fig. II-25).

*Butée arrière.* — Elle est réglable à la main, et plus généralement à l'aide d'un moteur commandé de l'avant, avec lecture de la cote sur un tambour. Pour éviter le coincement et les frictions, pendant la coupe, entre la lame inférieure et le guide, celui-ci, dans certaines machines, s'écarte vers l'arrière, dès que les presse-tôles sont entrés en action.

*Exemple de coupe d'un gousset* (fig. II-25) :

1° Coupe de la tôle, en bandes de largeur (butée arrière).

2° Coupe des bandes, en rectangles (butée arrière, et règle d'équerrage, en avant).

3° Coupe oblique sur montage fixe, en butée avant.

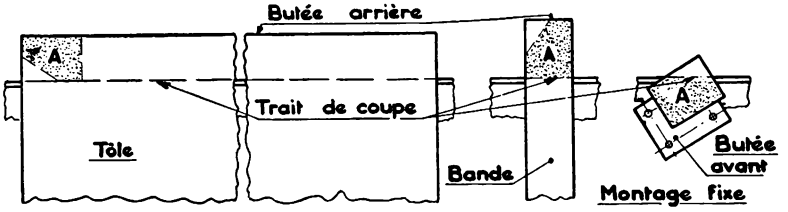



Fig. II-25. — Cisaillage d'un gousset à la guillotine.

## Cisailles pour découpages sinueux.

***Cisailles circulaires.*** — Les lames des machines précédentes sont remplacées par des molettes qui tournent en sens inverse et se croisent légèrement. Le croquis II-26 donne les formes types de molettes qui, par leur rotation, entraînent et cisaillent la tôle. Celle-ci n'est en contact, avec les molettes, que sur une faible surface, ce qui permet de couper suivant les tracés courbes.

Généralement, les 2 molettes sont motrices, mais dans certains modèles l'une est libre, l'autre est motrice et cannelée pour assurer l'entraînement des tôles. Les bâtis sont à col de cygne (fig. II-27, 28 et 30) ou dégagés (fig. II-29) et

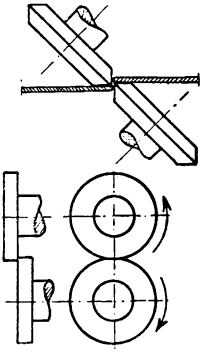


Fig. II-26. — Molettes.

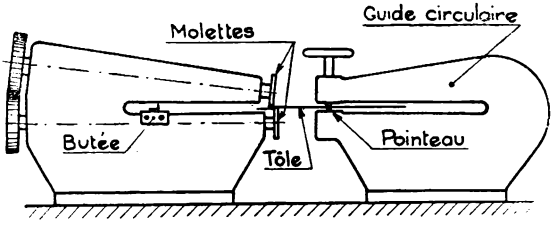



Fig. II-27. — Cisaille à molettes avec guide.

complétés par des butées pour les coupes droites, et par des guides circulaires pour le découpage des cercles sans tracé. Ces guides sont comparables à de grands serre-joints qui portent un pointeau que l'on engage dans le centre ou pour les métaux polis, par une griffe ou ventouse de serrage manœuvrée par un volant (fig. II-27).

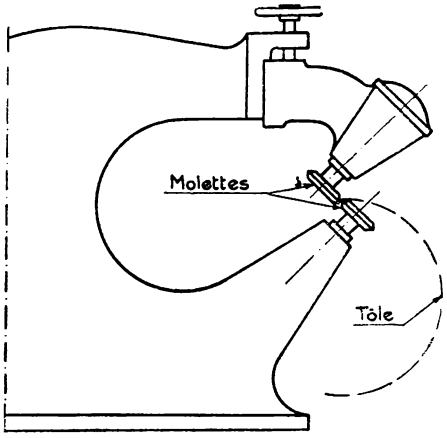



Fig. II-28. — Cisaille type « Nageotte ».

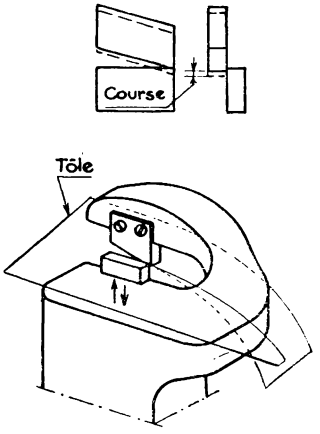



Fig. II-29.

Les tôles découpées sur ces cisailles sont souvent déformées et il faut une grande habitude pour suivre parfaitement le tracé.

***Cisailles alternatives.*** — Ces cisailles sont caractérisées par les dimensions réduites de leurs lames, et par leur mouvement alternatif rapide, et de faible amplitude. A chaque course, la tôle est coupée sur une petite longueur, ce qui permet d'utiliser un moteur peu puissant. Exemple : 1 ch pour tôle de 5 mm en acier.

Les bâtis sont à col de cygne (fig. II-30) d'une profondeur de 1 m à 1,50 m, et les machines portatives ont des bâtis dégagés (fig. II-29) pour le passage en pleine tôle.

Les lames qui sont généralement des barreaux d'acier de 15 à 25 mm de côté, ont des formes diverses : droites pour coupes droites, arrondies (fig. II-30 *bis*), pour coupes sinueuses, étroites pour petits rayons. Non seulement les lames ne croisent pas, mais il reste entre elles un

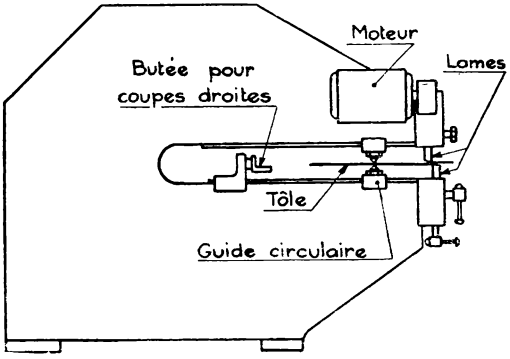



Fig. II-30. — Cisaille type « Pullmax ».

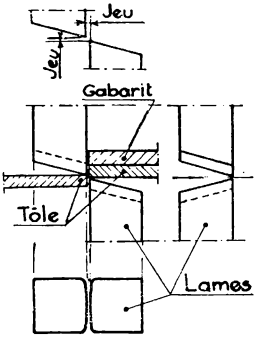



Fig. II-30 *bis*.
Lames « Pullmax ».

jeu *b* à fond de course (fig. II-31). Les jeux *a*, et *b*, sont fonction de l'épaisseur à couper. Par le changement rapide des porte-outils, ou par leur rotation, on peut inverser la position des lames, afin de reporter la déformation, sur l'un ou l'autre des bords (fig. II-31 *bis*).

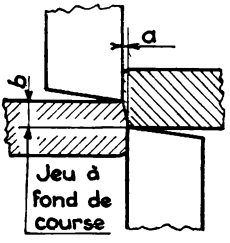



Fig. II-31. — Lames « Pullmax ».

Fig. II-31 *bis*.

Le mouvement alternatif (course) est obtenu par un excentrique : cadence de 400 à 4 000 coups à la minute; course : 2 à 3 mm pour tôles de 4 mm, et jusqu'à 10 mm pour tôles épaisses. La cadence et la course, réglables facilement, varient avec l'épaisseur à couper.

Un dispositif de relevage de l'outil supérieur permet le défonçage en pleine tôle pour les coupes fermées.

Il est possible de couper au tracé, mais on utilise plutôt les guides ou des gabarits. Pour les coupes droites, il existe un guide droit

(fig. II-32) avec une règle graduée, ou mieux des butées réglables; les disques sont découpés à l'aide des guides circulaires placés dans le col de cygne (fig. II-33) ou fixés à l'avant de la machine sur un montage amovible, pour les grands diamètres. Dans le cas de contours sinueux, on usine un gabarit fixé sur la tôle (fig. II-34).

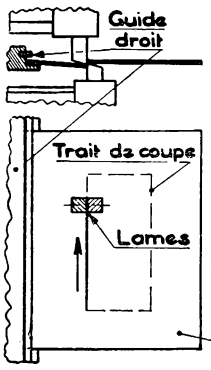



Fig. II-32.

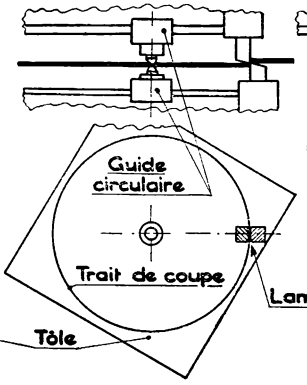



Fig. II-33.

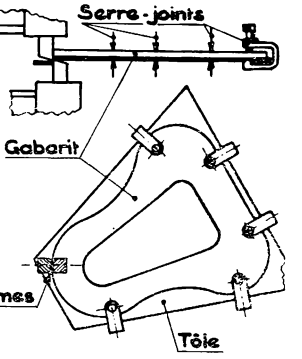



Fig. II-34.

Fig. II-32. — Découpage d'une ouverture rectangulaire, sans tracé, la tôle étant butée sur le guide droit.

Fig. II-33. — Découpage d'un cercle sans tracé à l'aide du guide circulaire placé dans le col de cygne.

Dans d'autres machines ce guide peut être à l'extérieur du col de cygne comme figure II-27 (cercles plus grands).

Fig. II-34. — Découpage sur gabarit qui bute sur la lame supérieure ; dans les petites séries, le gabarit peut être la première pièce usinée avec soin.

La tôle n'est pas entraînée, et il faut exercer une pression pour l'avance de la coupe, ce qui facilite le guidage.

Malgré la faible course des lames, l'un des bords est légèrement déformé. Pour remédier à cet inconvénient, sur certaines machines on peut monter des outils de cochage (brevet Trumpf) qui font une double coupe en forme de rainure, avec une chute de la largeur de la lame (fig. II-34 *bis*); les deux bords restent parfaitement plans.

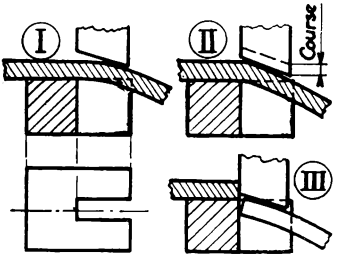



Fig. II-34 *bis*.
Outils de cochage « Trumpf ».

Sur la plupart de ces machines, on peut monter des outils de grignotage et de mise en forme (voir p. 61 et 174).

## LE POINÇONNAGE

**Principe.** — C'est un cisaillage exécuté le plus couramment suivant une circonférence. Le métal est cisaillé par les arêtes vives d'un poinçon et d'une matrice de forme et de dimensions correspondantes (fig. II-35).

On peut poinçonner avec un poinçon à main sur un tas en plomb

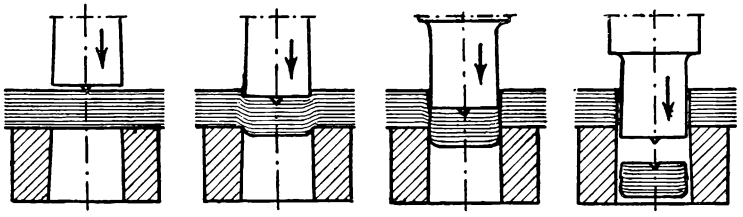


Fig. II-35. — Principe du poinçonnage.

durci par addition de zinc. Cette méthode déforme les tôles, fait des bavures et ne peut s'appliquer qu'aux travaux peu sérieux, en tôles minces.

***Poinçons et matrices de forme cylindrique.*** — Ces outils sont fabriqués en acier dur au carbone ou mieux avec des aciers spéciaux tenaces.

Leur forme est indiquée par la figure II-36. Les angles de dépouille et de pente de coupe $\alpha$ mesurent 3 à 4° pour l'acier non allié. Il n'y a pas intérêt à augmenter ces angles : les arêtes deviennent fragiles et d'une durée limitée, sans diminution appréciable de l'effort. Dans l'alésage de la matrice on laisse une portion cylindrique qui permet d'aviver l'arête par affûtage. Le téton de centrage qui se loge dans le coup de pointeau dépasse de 0,5 à 2 mm suivant le diamètre du poinçon.

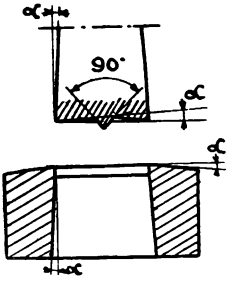



Fig. II-36. — Poinçon et matrice.

Entre le poinçon et la matrice on ménage un jeu total de l'ordre de 10 % de l'épaisseur de la tôle, soit 5 % de l'épaisseur tout autour.

***Poinçonneuses à levier.*** — La descente du poinçon est commandée par un excentrique ou une crémaillère avec ou sans démultiplication par engrenages.

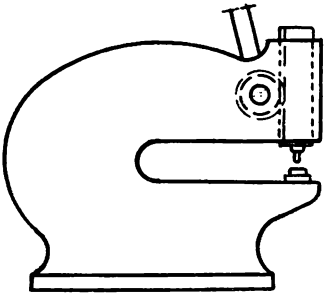


Fig. II-37.
Poinçonneuse à levier.

Les machines les plus répandues sont à un seul poinçon (fig. II-37), mais il en existe à poinçons multiples. Ceux-ci peuvent être en ligne et commandés par une came qui, par son déplacement sur l'arbre, est située au-dessus du poinçon choisi.

Dans d'autres modèles les poinçons et les matrices sont montés sur une tourelle-revolver. En tournant celle-ci, on peut présenter tous les poinçons sous la commande de la machine.

***Poinçonneuses mécaniques.*** — Les bâtis et les organes de commande sont les mêmes que ceux des cisailles mécaniques à col de cygne et souvent ils peuvent être équipés en cisaille ou en poinçonneuse.

Les dispositifs de fixation des poinçons et matrices sont étudiés pour permettre un montage et un démontage rapides. Les poinçons peuvent être montés avec une vis-pointeau, avec une goupille ou un écrou (fig. II-38). On place les matrices, sans les fixer, dans des sup-

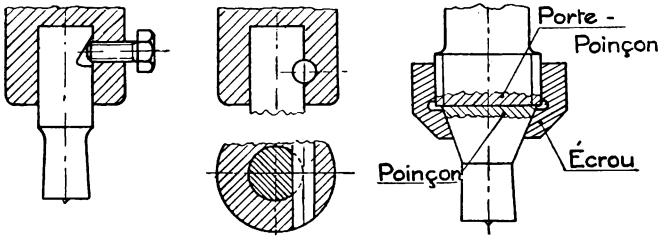



Fig. II-38. — Montage des poinçons.

ports genre crapaudine (fig. II-39), ou on les serre avec des coins réglables (fig. II-40). Ces porte-matrices sont bloqués sur la machine par des boulons qui s'engagent dans des rainures de la table.

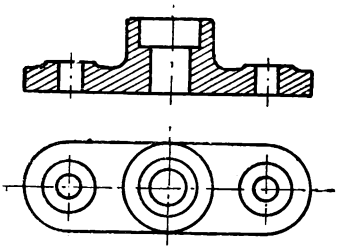


Fig. II-39.

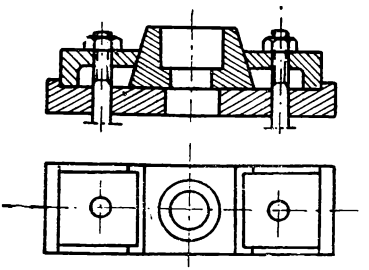


Fig. II-40.

Deux butées appelées fourchettes (fig. II-41) maintiennent la tôle à la montée pour permettre l'arrachage du poinçon. Pour les travaux de série, on peut monter, dans le col de cygne, des guides pour poinçonner sans tracé. Cette méthode manque de précision, mais il est possible d'équiper la machine avec de véritables montages de poinçonnage.

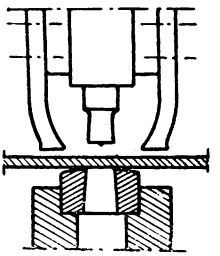


Fig. II-41.

***Avantages et inconvénients du poinçonnage.*** — Le poinçonnage a l'inconvénient d'écrouir le bord des trous et d'y faire de petites criques qui peuvent donner naissance à des cassures. De plus, les trous sont coniques surtout dans les fortes épaisseurs, en raison du jeu entre le poinçon et la matrice ; exige l'accès sur les deux faces de la tôle.

Par contre, le poinçonnage est plus rapide que le perçage, sauf pour les tôles minces et les alliages légers, et il est plus précis que le perçage sans calibre ; trous bien ronds, dans les tôles minces.

Les cahiers des charges des administrations (marine, travaux publics, chemins de fer, etc.) interdisent l'emploi du poinçonnage, en particulier pour les chaudières et les ouvrages soumis à de gros efforts (voir perçage, p. 74 à 78).

## LE GRIGNOTAGE

**Principe.** — C'est une opération de découpage par petites sections en forme de croissants (fig. II-42, 43 et 44) exécutée sur les mêmes machines que les cisailles alternatives (voir fig. II-30).

Les outils sont surtout de section circulaire, parfois carrée, pour les coupes droites.

Tous les poinçons ont un pilote qui reste engagé dans la matrice pendant la coupe, ce qui limite l'avance et maintient la tôle en position, quand on coupe au tracé.

***Poinçon plein.*** — Le pilote est solidaire du poinçon (fig. II-42); celui-ci peut se relever pour l'attaque en pleine tôle dans un trou percé à l'avance. Ces poinçons *ne coupent que d'un côté*, ce qui oblige à

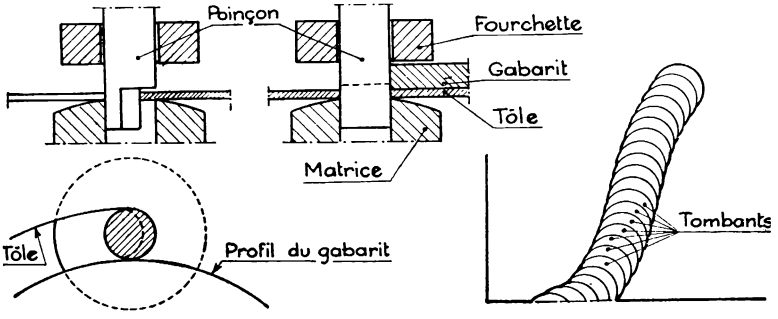



Fig. II-42. — Grignotage sur gabarit avec poinçon plein.

tourner la tôle dans les coupes sinueuses. Toutefois, dans certaines machines, le porte-poinçon peut être tourné, ce qui permet de couper dans des directions différentes. Diamètre du poinçon : 4 à 12 mm.

***Poinçon creux avec pilote dans le poinçon*** (brevet « Trumpf » fig. II-43). — *Peut couper tout le tour.* Le pilote peut s'effacer dans le poinçon pour l'attaque en pleine tôle (poinçonnage), puis il est redescendu pour le grignotage. Le poinçon et la matrice sont, dans ce cas, centrés par les organes de la machine.

***Poinçon creux avec pilote dans la matrice*** (brevet « Trumpf » fig. II-44). — Ce poinçon *coupe tout le tour* et le pilote s'efface sous la matrice (I) pour le défonçage en pleine tôle (II). Pendant le grignotage, le pilote remonté, *centre le poinçon et la matrice* (III). Diamètre des poinçons creux : 12 mm mini.

Avec tous les poinçons, une fourchette assure l'extraction à la remontée du poinçon, et on peut régler la cadence et la course, en fonction de l'épaisseur.

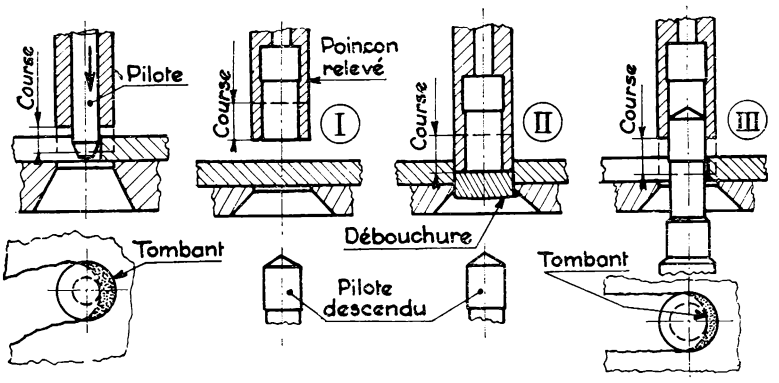



Fig. II-43.

Fig. II-44.
Poinçons de grignotage (Brevet Trumpf).

**Méthodes de découpage.** — Le découpage *au tracé* est possible, mais avec quelques difficultés. Aussi, on utilise, comme dans les cisailles alternatives, et de la même façon, des *guides droits* et *circulaires* (voir fig. II-32 et II-33), ou mieux des *gabarits* (voir fig. II-34 et II-42).

***Découpage par copiage sur coordonnées.*** — Dans ce cas, il faut des poinçons coupant *tout le tour* (fig. II-43 et II-44) et des machines équipées spécialement. Un chariot *A* (fig. II-45), se déplace dans l'axe du bâti, et porte un deuxième chariot *B*, qui se déplace dans le sens perpendiculaire (chariots croisés).

La tôle est fixée par des griffes *C*, sur le chariot *B*, et elle peut être déplacée suivant n'importe quelle coupe, par la combinaison des mouvements des deux chariots.

En bloquant le chariot *B*, par le levier *D*, on coupe en ligne droite parallèlement à l'axe de la machine, et en bloquant le chariot *A*, par le levier *E*, on coupe dans le sens perpendiculaire.

De plus, une console *F*, fixée sur le bâti, porte un compas *G*, pour les coupes circulaires. Un palpeur *H* (du diamètre du poinçon) solidaire du chariot *B*, peut être fixé dans le compas, au rayon désiré. Les deux chariots étant débloqués, en tournant le palpeur à la main, on découpe des cercles au rayon choisi.

Pour les profils quelconques, on usine un ou plusieurs gabarits, que l'on fixe sur la console. Le palpeur est maintenu, et déplacé, le

long du gabarit, et par la combinaison des mouvements des deux chariots débloqués, on peut découper rapidement, les contours les plus tourmentés.

Avec tous les types de poinçons, la coupe n'est pas lisse et généralement il faut un coup de lime ou de meule; par contre, *les bords ne présentent aucune déformation.*

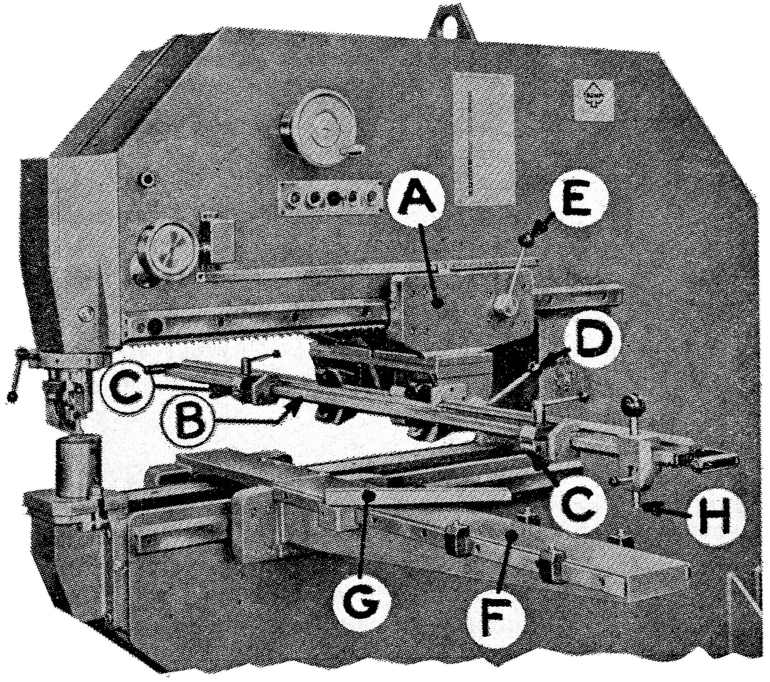



Fig. II-45. — Grignoteuse « Trumpf » par copiage sur coordonnées.

Le grignotage — qui peut découper des tôles d'acier non allié de 10 mm d'épaisseur et plus, avec les grosses machines — est utilisable pour les pièces unitaires et les toutes petites séries; avec des gabarits, par copiage, il est très avantageux pour les moyennes séries.

Pour les grandes séries, il existe aussi des machines à *lecture optique*, dans lesquelles le palpeur est remplacé par une tête de lecture photoélectrique, qui suit le contour d'un dessin.

On trouve aussi des machines à commande numérique.

## LE GRUGEAGE

Du même principe que les outils précédents, le grugeoir est de plus grandes dimensions. Pour diminuer l'effort instantané, les arêtes du poinçon forment un angle de 5 à 10° environ avec celles de la matrice (fig. II-45 *bis*). Le porte-poinçon a généralement une forme dégagée pour le découpage des profilés. C'est surtout dans ce travail que le grugeage a le plus d'applications (entailles diverses, coupes d'onglet pour coudage de cornières, etc.). On peut également faire des entailles peu profondes sur le bord des tôles et même suivre un tracé courbe, à condition que la chute soit étroite.

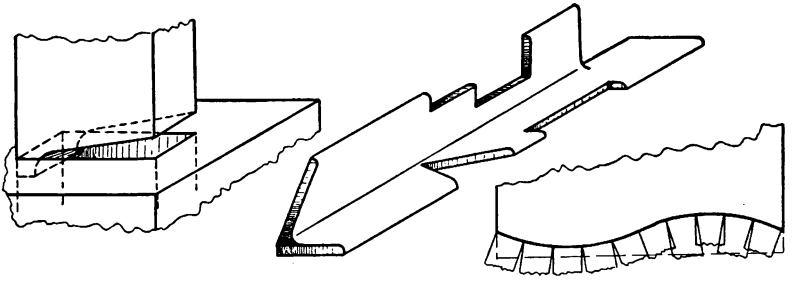


Fig. II-45 *bis*. — Grugeoir et découpages sur grugeoir.

**Machines à outils multiples.** — Sur un seul bâti on monte plusieurs outils ayant des organes de commande communs : moteur, volant, réducteur de vitesse, arbre, etc. Les excentriques sont calés de telle sorte que les outils ne travaillent pas simultanément.

On trouve souvent la combinaison cisaille-poinçonneuse, mais il existe des machines possédant en plus de la cisaille-poinçonneuse, une cisaille à profilés, une cisaille à fers ronds et carrés et même un grugeoir. Pour petits ateliers aux travaux variés.

## UNITÉS DE POINÇONNAGE

Ces unités comprennent essentiellement un poinçon et une matrice, montés et centrés, sur un petit bâti à col de cygne, le plus souvent (fig. II-46) et parfois sur deux bâtis indépendants (fig. II-46 *bis*). Sur le même bâti, on peut changer facilement, et rapidement, des poinçons de diamètres différents.

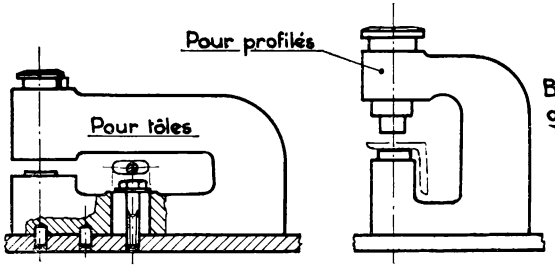



Fig. II-46.

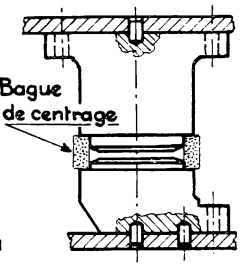



Fig. II-46 *bis*.

Unités de poinçonnage.

Les unités sont montées sur un plateau de presse ou sur une fausse table rainurée, fixée sur une presse plieuse (fig. II-47 III). L'effort de poinçonnage est fourni par la presse, sans qu'il y ait liaison entre le plateau supérieur et les poinçons. L'extraction est assurée par un dévêtisseur, commandé par un ressort puissant (rondelles Belleville, ressort à boudin, rondelles caoutchouc) monté dans l'unité (fig. II-46 *ter*).

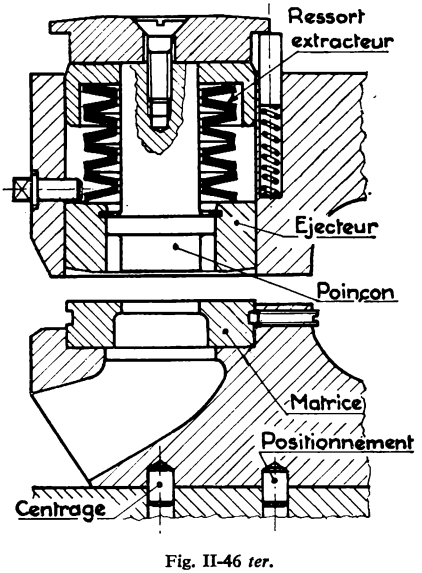



Fig. II-46 *ter*.
Détails (type « Supra »).

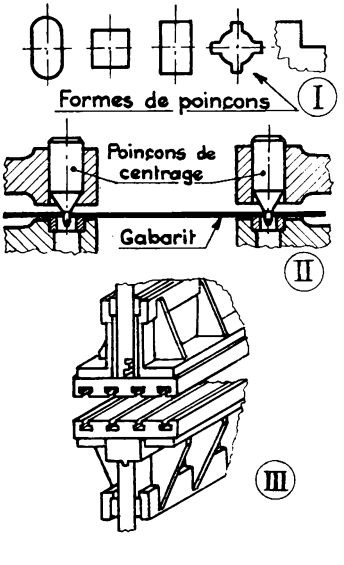



Fig. II-47.

Les poinçons, le plus souvent circulaires, peuvent avoir des formes variées (fig. II-47 I). On utilise également des unités de grugeage et d'encochage (fig. II-47 *bis*) dans lesquels les outils sont des lames.

***Montage pour pièces unitaires ou très petites séries.*** — Les unités sont fixées sur des tables rainurées à l'aide de boulons ou de brides. On usine un gabarit, en tôle mince, aux formes et dimensions de la pièce à exécuter, et après avoir tracé les axes des trous à poinçonner, on perce des trous de petit diamètre : 3 à 4 mm.

Dans les unités, on enlève les pions de centrage et de positionnement, et on remplace les poinçons de découpage par des poinçons de centrage : ⌀ 3 à 4 mm (fig. II-47 II).

Les unités se trouvent ainsi positionnées les unes par rapport aux autres, puis on les bloque. On ajoute les butées de positionnement de la tôle, et les règles supports.

Les poinçons de centrage sont alors remplacés par les poinçons de découpage, et l'outillage est en ordre de marche.

***Montage pour séries.*** — Les unités sont montées sur une plaque acier (épaisseur ≈ 10 mm), dans laquelle on a percé, avec précision, des trous pour les pions de centrage, qui sont dans l'axe du poinçon. Puis, on perce un trou, que l'on taraude, pour fixer l'unité (fig. II-46), et un trou pour le pion de positionnement, si le poinçon n'est pas circulaire; on ajoute les butées pour la tôle et les supports (fig. II-47 *bis*).

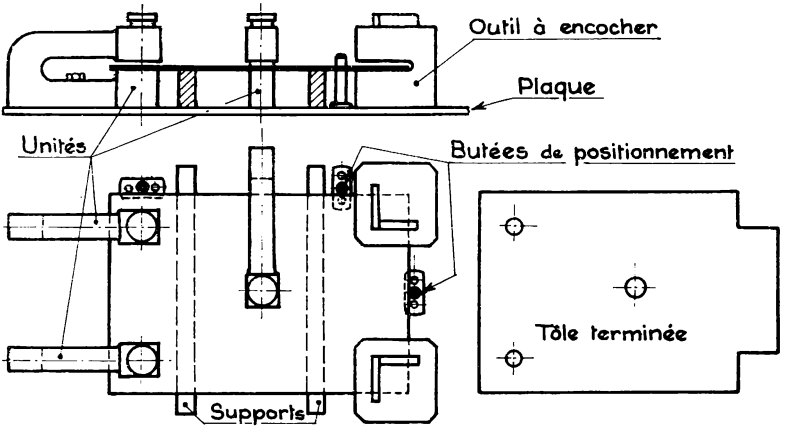



Fig. II-47 *bis*. — Montage d'unités de poinçonnage.

***Unités indépendantes.*** — Dans ce cas, il faut deux plaques — usinées ensemble — l'une pour les porte-matrices et l'autre pour les porte-poinçons. On contrôle le positionnement à l'aide de bagues de centrage (fig. II-46 *bis*) et le plus souvent, on monte des colonnes de guidage. Ces unités sont utilisées pour les trous loin du bord, et pour les pièces avec bords ou profilés.

Pour les moyennes et même grandes séries, ces outillages remplacent avantageusement, et surtout économiquement, les outils de découpage sur presse, très coûteux, et réservés aux très grandes séries.

## LE DÉCOUPAGE A LA PRESSE

Même principe que le cisaillage et le poinçonnage.

Le contour de la pièce à découper est cisaillé par les arêtes vives d'un poinçon et d'une matrice de la forme exacte de la pièce à obtenir. Le jeu entre le poinçon et la matrice varie avec l'épaisseur : 5 % de l'épaisseur environ (double jeu 10 %). Ce jeu peut être diminué de moitié pour les pièces de précision et dans les coupes droites.

On utilise, de préférence, des presses mécaniques à faible course, dont le bâti est à col de cygne ou à arcade pour les petites pièces ou à montants pour les grands découpages (voir fig. III-251 à 254).

Le poinçon est généralement monté sur le coulisseau, et la matrice sur la table ; dans certains outils on inverse cette disposition (poinçon fixe et matrice mobile). L'effort maximal est fourni au point mort bas du coulisseau (voir fig. III-250) et pour cette raison, le poinçon doit s'engager le moins possible dans la matrice. Il faut une série importante pour amortir les outils toujours coûteux : aciers spéciaux et difficultés d'exécution surtout.

### Principaux types d'outils de découpage.

***Outil parisien simple*** (fig. II-48). — Sur la matrice est fixé le le *dévêtisseur* (ou décolleur) qui assure le guidage du poinçon et qui sert d'extracteur de bande, à la remontée du poinçon. Le guidage du poinçon n'est garanti que si celui-ci ne sort pas du dévêtisseur au point mort haut, ce qui exige des presses à faible course.

Les tôles sont généralement utilisées sous forme de bandes qui sont guidées par une saignée de largeur, ménagée entre la matrice et le dévêtisseur.

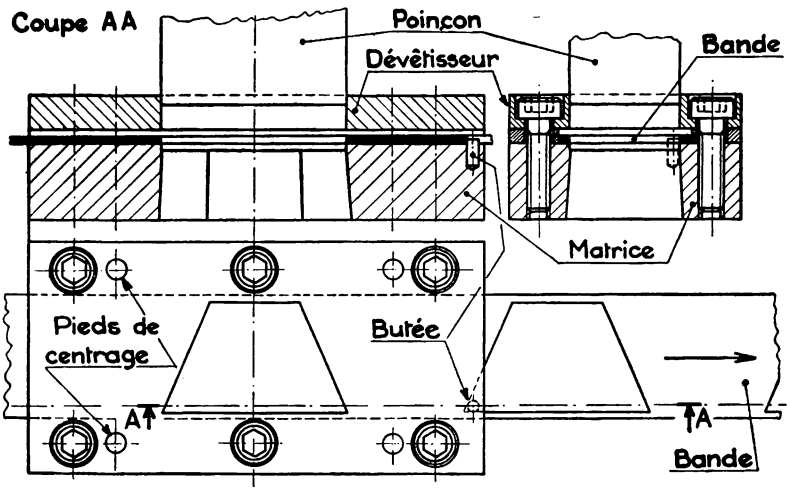



Fig. II-48. — Outil de découpage simple dit « Parisien ».

A chaque coup d'outil, l'avance est limitée par une butée sur laquelle la bande vient s'appuyer dans le trou précédemment découpé, ou encore, par des entailles exécutées par des couteaux (voir fig. II-51). Par retournement de la bande on diminue la perte de métal lorsque la forme le permet (fig. II-49). On augmente le rendement en montant, sur un même outil, plusieurs poinçons avec les matrices correspondantes. Ces outils conviennent pour les petites pièces et pour les séries moyennes.

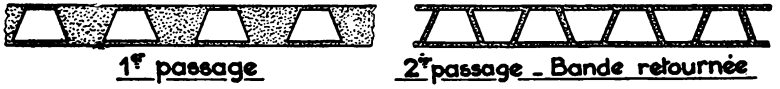



Fig. II-49. — Disposition des coups de poinçon dans la bande.

*Outils de découpage progressif.* — Ces outils, utilisés pour les pièces percées de trous, sont composés de 2 jeux de poinçons, quelquefois plusieurs : le poinçon découpeur et les poinçons perceurs.

La figure II-50 donne un exemple d'outil progressif. Un poinçon découpe le contour et 2 autres poinçons percent les trous. Chaque coup de poinçon livre une pièce terminée, sauf le premier coup qui donne une pièce découpée mais non percée. Une application courante de cet outillage est la fabrication des rondelles.

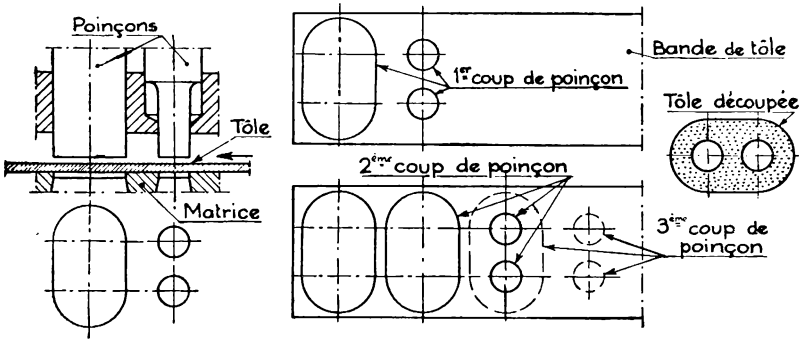



Fig. II-50. — Outil de découpage progressif.

L'outil de la figure II-51 est également à découpage progressif. En partant d'une bande, la forme finale du produit découpé est obtenue par l'action de 3 poinçons en ligne : le premier poinçonne le petit trou central, le second fait le découpage intérieur et le troisième découpe l'extérieur. Deux couteaux entaillent la bande de chaque côté, souvent d'un seul couteau ; ces entailles dont la longueur est égale

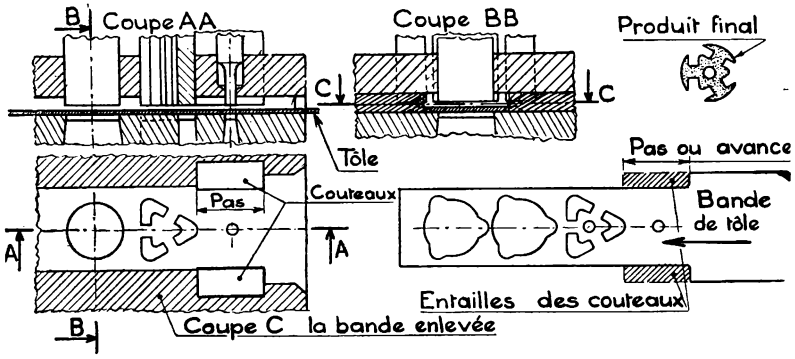



Fig. II-51. — Outil de découpage progressif, ou « à suivre. »

au « pas » — c'est-à-dire à l'avance entre chaque coup de poinçon — assurent une mise en place parfaite qui garantit le centrage correct des 3 coups de poinçons.

Dans tous ces outils, il faut un dégagement, sous la matrice (pont), pour évacuer les débouchures, ou les pièces découpées.

En partant du principe de ces outils, on peut concevoir pour les pièces de petites dimensions des poinçons progressifs multiples à grand rendement.

Il existe des outils de découpage combinés spéciaux, avec avance automatique pour fabrication en grande série, et dont l'étude sortirait du cadre de cet ouvrage.

***Outils « bloc-suisse ».*** — Outils qui forment un tout et qui sont constitués par 2 bâtis (fig. II-52) dont l'un porte le poinçon, et l'autre la matrice, et dont le déplacement relatif est parfaitement guidé par deux colonnes (quatre dans les grands outils). L'ensemble est ainsi facile à monter et toujours réglé.

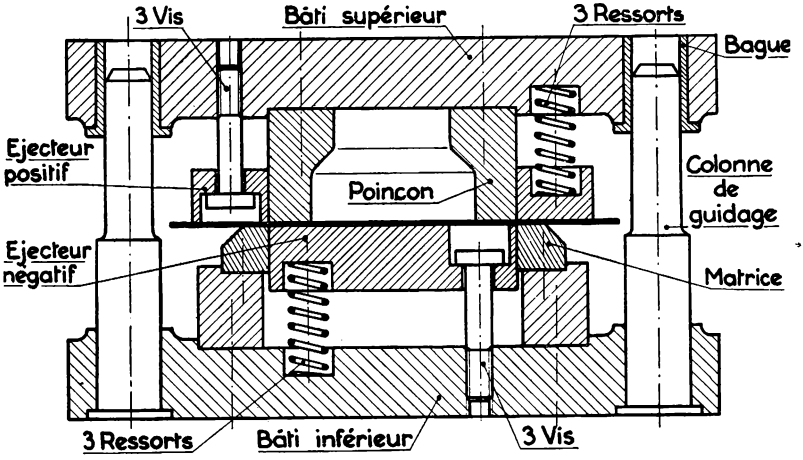



Fig. II-52. — Outil « bloc-suisse ».

L'extraction de la débouchure (au-dessus de la matrice) et de la bande (hors du poinçon) peut être obtenue, soit par des extracteurs à ressorts (fig. II-52), soit par les organes d'éjection de la presse, soit par combinaison des deux systèmes. La course des extracteurs à ressorts est limitée par des vis (fig. II-52).

Dans tous les gros outils, les lames sont en plusieurs éléments encastrés et positionnés avec beaucoup de précision dans les bâtis (fig. II-52).

***Outil combiné de découpage et poinçonnage du type inversé sur bloc à colonnes.*** — Mêmes bâtis et même guidage que figure II-52.

Sur la figure II-53, le bâti inférieur porte le poinçon pour le découpage extérieur et les matrices des découpages intérieurs. Inversement, sur le bâti supérieur sont fixés la matrice du découpage extérieur et les poinçons des découpages intérieurs.

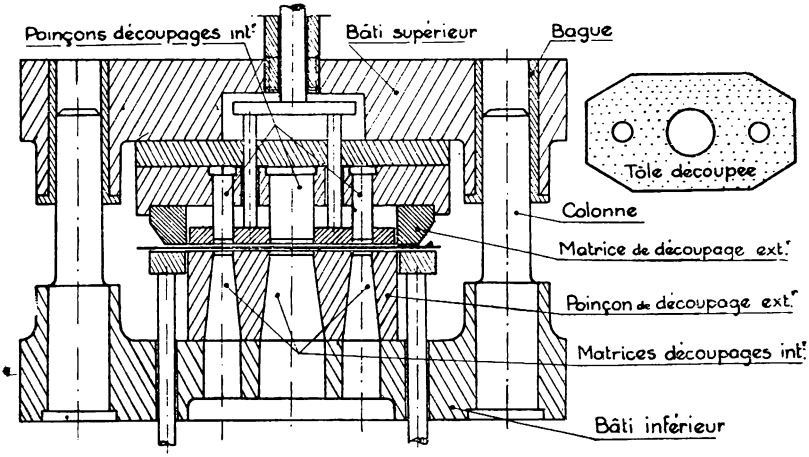



Fig. II-53. — Outil combiné du type inversé.

Extractions par les systèmes d'éjection de la presse : l'extraction supérieure ou positive (voir fig. III-255) sort la tôle découpée de dans la matrice, en dévêtissant les poinçons des découpages intérieurs ; l'extraction inférieure ou négative (voir fig. III-256 et 257) sort la bande ou la chute de sur le poinçon de découpage extérieur.

Ainsi conçus, ces outils qui ont le défaut d'être coûteux conviennent aux grandes séries et aux moyennes et grandes dimensions.

## DÉCOUPAGE PAR ENLÈVEMENT DE COPEAUX

**Scies circulaires et à ruban.** — Pour le sciage des tôles embouties ou formées on utilise des scies à ruban et des scies circulaires à denture spéciale très fine. Les pièces à couper sont présentées à la scie, fixées dans des montages qui donnent l'inclinaison convenable.

### Machines spéciales de découpage pour les alliages légers.

***Scies à ruban.*** — Sur un bâti de scie à ruban de menuisier, on monte une lame de scie à denture spéciale (fig. II-54). Avec une denture fine on peut scier même les tôles minces.

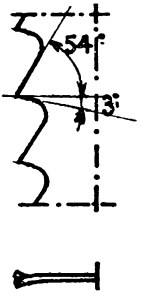


Fig. II-54.

***Toupies.*** — Par leur mode de travail, les toupies s'apparentent aux machines d'usinage des métaux et des bois.

Une fraise à une ou deux dents est animée d'un mouvement de rotation très rapide (15 000 à 18 000 tr/mn). Les tôles à découper, débitées en rectangles à la cisaille guillotine, sont serrées en paquets (épaisseur totale maximum 8 mm environ) sur un montage qui porte sur sa face inférieure un gabarit reproducteur de la forme du découpage à exécuter (fig. II-55).

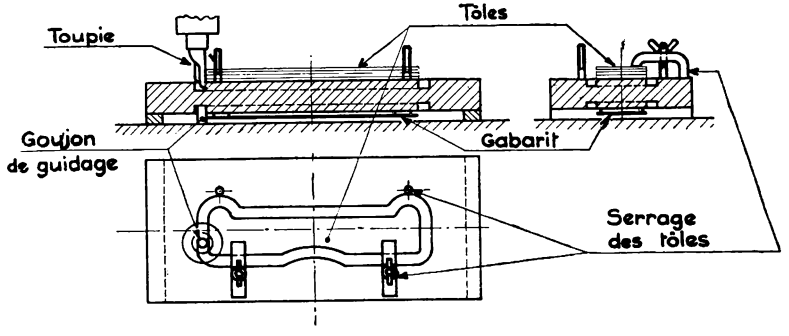


Fig. II-55.

Le montage est déplacé à la main sur la table de la machine, de telle sorte que le goujon de guidage — qui a même diamètre que le cylindre décrit par l'arête de coupe — soit toujours en contact avec le reproducteur.

La tête de la machine et la table sont réglables en hauteur et pour usiner tout le contour on fait une reprise en déplaçant les brides de fixation. Avec une machine bien réglée, on peut découper sans tracé les profils les plus variés, avec précision, et sans aucune déformation.

Il existe des machines dans lesquelles le montage est fixe, et où la tête de l'outil se déplace à l'extrémité d'un bras articulé.

## LE PERÇAGE

Fig. II-56.

Fig. II-57.

Exécution de trous circulaires à l'aide de forets.

**Outillage.** — Forets hélicoïdaux, à queue cylindrique ou à cône Morse, série courte de préférence. Qualité : acier rapide (fig. II-56). Forets spéciaux pour alliages légers (fig. II-57).

| | Angle d'hélice | Angle de pointe | Angle de dépouille | Vitesse de coupe m/mn | Avances mm/tr |
|---|---|---|---|---|---|
| Pour acier . . . | ≈ 25° | 120° | 4° | ≈ 25 | 0,01 à 0,015 |
| Pour alliages légers. | 40 à 50° | 140° | | de 150 à 400 | 0,05 à 0,3 |

***Trépans*** à couteaux obliques réglables (fig. II-58) ou à couteaux verticaux (fig. II-59). Outils centrés à l'aide d'un pilote dans un avant-trou. Perçage de trous de grands diamètres.

***Machines à percer fixes ordinaires :*** sensitives, à colonne, radiales, pour petites pièces.

***Machines spéciales fixes.*** — *Radiales,* de *grande portée* (fig. II-61) pour percer loin du bord.

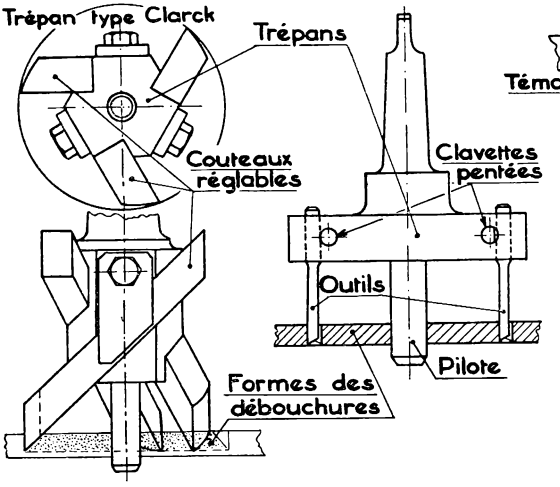



Fig. II-58.

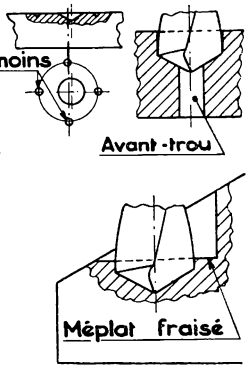



Fig. II-59.

Fig. II-60.

***Perceuses latérales*** (fig. II-62). — Broche horizontale permet de travailler sur les parois verticales ou légèrement inclinées sur la verticale (30° au plus).

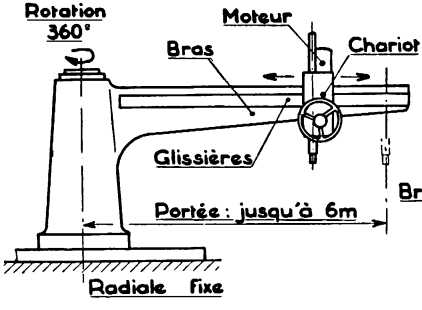



Fig. II-61. — Radiale fixe.

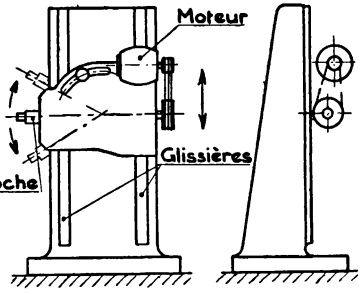



Fig. II-62. — Perceuse latérale.

***Machines spéciales mobiles.*** — Perceuses montées sur chariot coulissant sur un *banc vertical* (fig. II-63) ou *horizontal* (fig. II-64).

Radiales sur *portique* roulant se déplaçant sur rails ; pendant le travail, le portique est immobilisé par des vérins à vis (fig. II-64).

Les machines mobiles, indiquées pour la grosse chaudronnerie et pour la charpente, ne peuvent pas donner une grande précision. Elles sont utilisées souvent pour agrandir les trous poinçonnés après montage.

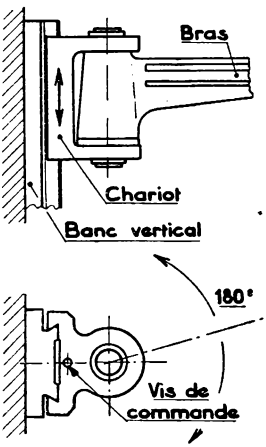



Fig. II-63.

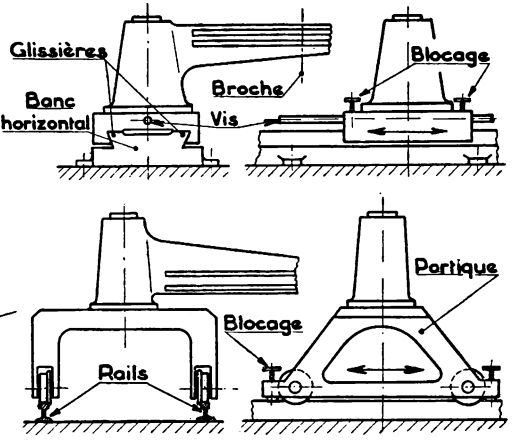



Fig. II-64. — Radiales mobiles.

***Perceuses portatives.*** — La chignolle à main est remplacée par les chignolles électriques et pneumatiques.

*Chignolles électriques.* — La carcasse du moteur est en alliage léger et la broche est montée souvent en bout d'arbre. Les règlements concernant la prévention des accidents exigent une installation à basse tension (24 V) pour supprimer les risques d'électrocution. Dans les fabrications aéronautiques on utilise, pour le perçage des tôles de duralumin, des petites machines légères tournant à grande vitesse : 2 000 à 3 000 tr/mn.

Certains constructeurs ont mis au point une transmission par flexible dans une gaine pour alléger la tête de l'outil. Le moteur est suspendu à un petit chariot qui se déplace sur une poutre. Ces machines ont des inconvénients qui proviennent de la rigidité de la gaine et des vibrations du flexible.

*Chignolles pneumatiques.* — Les machines pneumatiques à moteur rotatif volumétrique sont plus souples, plus rapides, et moins fragiles.

Dans un cylindre, un rotor excentré porte des rainures, dans lesquelles glissent des palettes (fig. II-65). L'air comprimé arrive en A et entraîne le rotor. L'étanchéité est obtenue par la force centrifuge qui applique les palettes sur la face intérieure du cylindre.

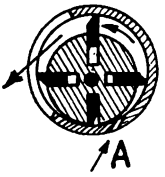



Fig. II-65. — Schéma d'un moteur à air comprimé.

**Pratique du perçage.** — Donner un coup de pointeau suffisant — au centre — pour guider le foret. Pour les moyens et gros diamètres, placer des témoins (fig. II-60) pour contrôler le centrage du trou ; corriger l'empreinte, s'il y a lieu, si le trou est « coulé ». Un avant-trou de petit diamètre assure le guidage des gros forets (fig. II-60). Lorsque l'on doit attaquer sur une surface inclinée, percer un petit avant-trou, ou mieux fraiser un méplat horizontal (fig. II-60).

**Montages de perçage.** — Dès que la série en vaut la peine et pour les trous obliques (fig. II-67), on exécute des montages avec des « canons » de perçage en acier traité, qui guident le foret et garantissent une grande précision, en supprimant le traçage et le pointage ; on perce souvent les tôles en paquets (fig. II-66).

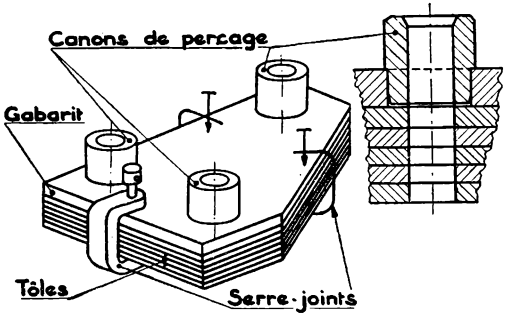



Fig. II-66. — Perçage en paquets.

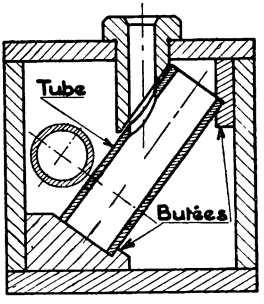



Fig. II-67.
Montage de perçage.

## Avantages du perçage sur le poinçonnage.

Le perçage tend à se substituer de plus en plus au poinçonnage.
Diamètre du foret indépendant de l'épaisseur (petits forets dans tôles épaisses).

Trous cylindriques (et non coniques).
Pas de déformations des tôles.
Pas d'écrouissage des bords du trou.
Perçage de trous loin du bord.
Accès d'un côté de la tôle seulement.
Perçage d'ensembles montés.
Perçage en paquets et avec montages de perçage.

On combine souvent les 2 procédés : les trous sont poinçonnés aux 2/3 de leur diamètre définitif. L'ensemble est monté avec quelques boulons et un foret du diamètre des rivets est passé dans tous les trous. Cette méthode fait disparaître la zone écrouie et supprime l'alésage.

## LE CHANFREINAGE

La préparation des soudures en tôles moyennes et épaisses exige des chanfreins de formes variées (voir fig. II-68 et IV-58), dont les plus courants sont en V et en X avec des angles de 45° à 60° et des talons pour le soudage à l'arc (fig. II-68).

A défaut de machines spéciales, **le burin pneumatique** peut être utilisé.

**Par grignotage.** — A l'aide de machines portatives, électriques ou pneumatiques, du même principe que les cisailles alternatives (brevet Trumpf). Un excentrique tournant de 300 à 500 tr/mn actionne un outil étroit (burin), qui cisaille le chanfrein, sur une faible largeur (fig. II-68). La tôle est butée sur une plaque support, et l'avance est

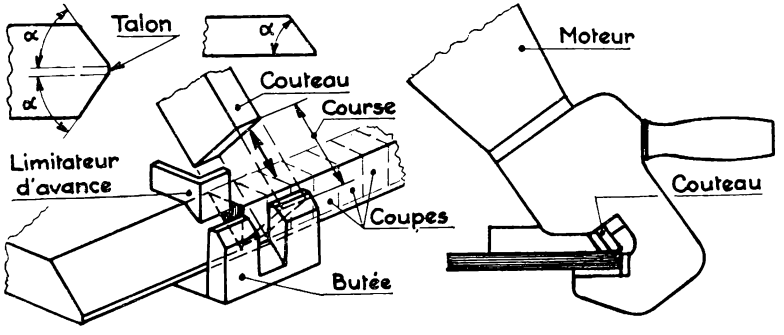



Fig. II-68. — Grignoteuse portative « Trumpf ».

limitées par une pièce accolée au burin. Ces machines dont la capacité est limitée à une largeur de chanfrein de 10 mm, peuvent chanfreiner en ligne droite ou courbe, sans déformations des bords.

**Chanfreineuse à molettes.** — La tôle s'appuie sur une molette horizontale *A*, et sur des galets de soutien *B*, et elle peut être butée sur des galets de guidage verticaux réglables *C* et $C_1$, et sur une butée *F* (fig. II-69). Un presse-tôle *D* s'oppose au déverse-

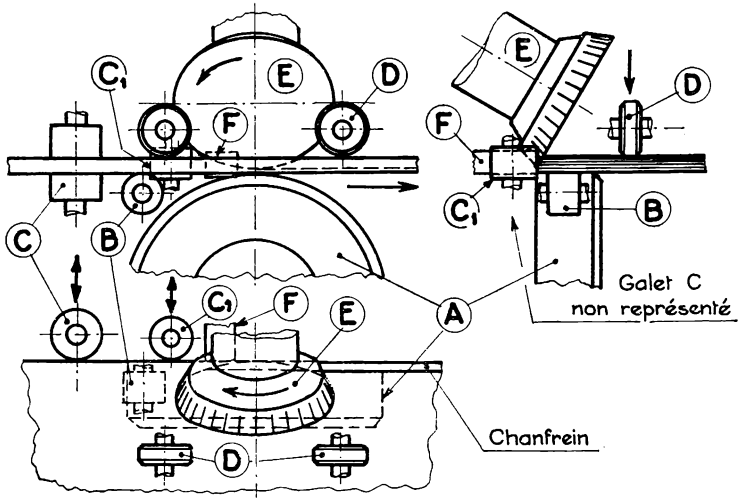



Fig. II-69. — Chanfreineuse à molettes type « Pullmax ».

ment, et le chanfrein est cisaillé par une molette coupante *E*, inclinée à l'angle du chanfrein désiré, et striée pour l'entraînement.

**Cisaille-chanfreineuse.** — C'est une cisaille guillotine hydraulique, équipée d'un porte-lame oscillant (brevet Corpet-Louvet) portant deux lames superposées, dont l'une coupe la tôle d'équerre, à longueur, et l'autre exécute le chanfrein (fig. II-70). Le porte-lame oscillant tourne d'abord autour d'un axe *O* (II) pour exécuter la coupe d'équerre, puis il tourne ensuite autour d'un deuxième axe $O_1$ (III) pour la coupe du chanfrein.

Cette machine — qui peut être utilisée en guillotine ordinaire — donne, très rapidement, des chanfreins de 60°, parfaitement réguliers.

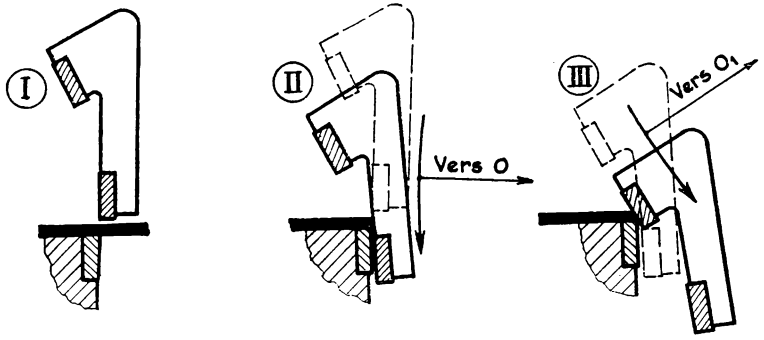



Fig. II-70. — Schéma de principe d'une cisaille-chanfreineuse « Corpet-Louvet ».

**Chanfreineuse dite « raboteuse »** (fig. II-71). — Avec des outils de rabotage, on *usine* en ligne droite seulement, les chanfreins en une, ou plusieurs passes, suivant l'épaisseur : tôles épaisses en V ou en X, et chanfreins spéciaux pour tôles très épaisses (voir fig. IV-59).

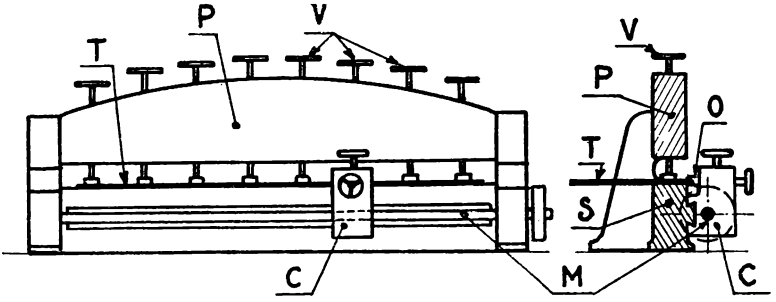



Fig. II-71. — Schéma d'une machine à chanfreiner en ligne droite.

— La tôle *T* est fixe et maintenue sur la table *S* de la machine par des vérins à vis *V* qui prennent appui sur une poutre robuste *P*. L'outil *O* est monté sur un chariot *C* qui se déplace parallèlement au bord de la tôle. Ce chariot est commandé par une vis *M* et porte, soit 2 outils, soit une combinaison pour travailler à l'aller et au retour.

Ces machines dont la longueur utile peut atteindre 10 m exécutent des chanfreins parfaits, sans aucune déformation, mais d'un prix de revient plus élevé.

Les chanfreins peuvent être exécutés *au chalumeau oxy-coupeur* (voir fig. II-85), pour aciers non alliés, par *oxy-coupage à la poudre* (voir fig. II-86) pour aciers alliés, inoxydables et non ferreux et par *coupage au plasma* (voir fig. II-87) pour non ferreux.

## LE MEULAGE

Le meulage s'applique surtout à l'ajustage des tôles et fers d'acier découpés aux machines diverses et au chalumeau. On prépare aussi les soudures et les soudo-brasures par chanfreinage des bords, et on usine, après soudage, les cordons de métal déposé.

***Les meules.*** — En chaudronnerie, on utilise surtout des meules à gros grains d'alumine cristallisée (alundum, corindon) pour les métaux ferreux et de carbure de silicium (carborundum, crystolon) pour les non-ferreux. L'agglomérant est d'autant plus dur que l'épaisseur à meuler est plus faible. D'après le mode de fabrication, les meules se classent en 2 catégories principales : les meules *vitrifiées* et les meules *résinoïdes*. Les meules vitrifiées peuvent être utilisées avec des vitesses circonférentielles de 25 à 32 m/s ; les meules résinoïdes — dites à grande vitesse — agglomérées à l'aide de matières plastiques (bakélite surtout) sont moins fragiles et elles peuvent supporter des vitesses allant jusqu'à 80 m/s.

***Montage des meules.*** — Les bâtis sont robustes pour résister aux vibrations et ils portent des paliers à grande portée ou des roulements étanches aux poussières abrasives. Les grosses meules sont montées entre deux paliers, mais on adopte pour les meules de moyen et petit diamètre la solution en porte-à-faux.

Suivant que l'on meule sur la périphérie ou sur le plat, les meules sont appelées rondes ou lapidaires. Les meules rondes sont serrées entre deux plateaux de fonte. On interpose une rondelle de feutre ou de carton pour éviter le contact direct du métal sur la meule (fig. II-71 *bis*).

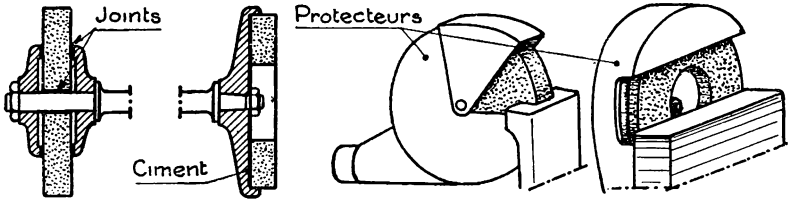



**Fig. II-71 *bis*. — Meule ronde et lapidaire.**

Sur un plateau, on colle les lapidaires avec un ciment spécial ou, mieux, on bloque la meule avec une bague ou des segments tronconiques, maintenus par des boulons dans le plateau. Les écrous en bout d'arbre sont à pas inverse et montés de telle sorte qu'ils tendent à se serrer par inertie pendant la rotation. La pièce est appuyée sur un support qui est maintenu aussi près que possible de la meule. Un aspirateur et des protecteurs sont indispensables.

***Pratique du meulage.*** — Par des taillages fréquents on enlève le faux-rond et on donne du mordant. Ce taillage est exécuté au diamant ou plus couramment avec un outil à molettes en fonte.

Une meule mal montée ou en mauvais état est une machine dangereuse. Il ne faut pas tolérer le faux-rond qui déséquilibre la meule et qui est une cause de vibrations et même d'éclatement.

Les pièces lourdes sont présentées doucement pour éviter les chocs et il est prudent de ne jamais meuler une pièce mince dans la position de la figure II-72. La meule peut entraîner la pièce, qui, en se coinçant entre le support et la meule, risque de faire éclater celle-ci. La figure II-72 *bis* indique les positions convenables d'une pièce mince pendant le meulage.

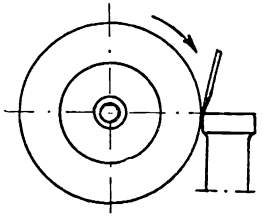


Fig. II-72. — Mauvaise tenue d'une pièce mince pendant le meulage.

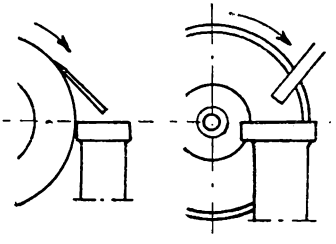


Fig. II-72 *bis*. — Présentation correcte.

On ne doit jamais meuler sans lunettes ou masque de protection.

***Meules portatives.*** — La commande peut être électrique directe ou par flexible, ou pneumatique et on retrouve le même principe et les mêmes types de machines que dans les perceuses portatives.

Le meulage de coupes au chalumeau, de chanfreins, de soudures, etc., sur pièces lourdes ou volumineuses, est exécuté avec des meuleuses angulaires, dans lesquelles le plan de la meule est parallèle à l'axe du moteur (renvoi d'équerre par pignons coniques). Les meules

sont, soit souples (abrasif collé sur toile) et dans ce cas, soutenues par un plateau de caoutchouc, soit rigides : meules résinoïdes armées de toiles noyées dans l'abrasif. On ne meule pas tout à fait sur le plat de la meule; le plan de celle-ci doit faire, avec la surface à meuler, un angle de 30 °C, pour le dégrossissage, et de 15° pour la finition.

## L'OXY-COUPAGE

Ce procédé s'applique surtout aux aciers non alliés, ou faiblement alliés. On coupe les inoxydables, et les non ferreux, à la poudre (fig. II-86) ou au plasma (fig. II-87).

**Principe.** — L'opération se fait en deux temps :

a) *Chauffage* à 1 300 °C environ.

b) *Projection d'un jet d'oxygène* de faible diamètre qui brûle le métal sur son passage, réalisant ainsi une saignée par *oxydation.* La pression de l'oxygène facilite l'expulsion de l'oxyde.

**Outillage.** — Pour la chauffe, on emploie soit l'acétylène, soit le propane ; pour l'oxygène il est recommandé d'utiliser des détendeurs à gros débit et à haute pression de détente, munis d'un réchauffeur à résistance électrique pour supprimer les inconvénients du givrage.

Dans un chalumeau coupeur (fig. II-73), il existe deux parties distinctes : le jet de coupe alimenté par un conduit muni d'un robinet indépendant à action rapide ; la flamme de chauffe comparable à celle d'un chalumeau soudeur est réglée de la même façon, par la manœuvre des robinets montés sur les tubes d'amenée des 2 gaz. La tête du chalumeau possède un orifice central (jet de coupe) entouré par la flamme de chauffe de forme annulaire ou par 5 petits trous qui alimentent des petites flammes indépendantes (fig. II-73 *bis*). Pour le

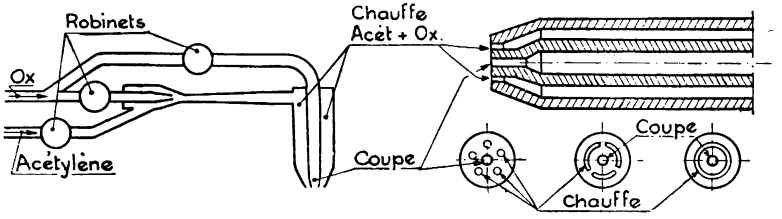



Fig. II-73. — Schéma d'un chalumeau découpeur.

Fig. II-73 *bis*. — Buse à jet de coupe central.

découpage à la main, la régularité du travail et la précision sont améliorées par l'utilisation de guides : guides à roulettes pour coupes droites, avec ou sans support inclinable pour chanfreins (fig. II-74) ; guides-compas pour coupes circulaires (fig. II-74 *bis*), guides-soutiens

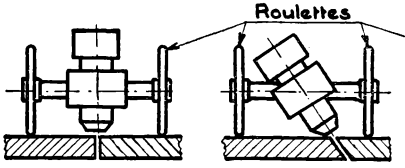



Fig. II-74. — Guide à roulettes.

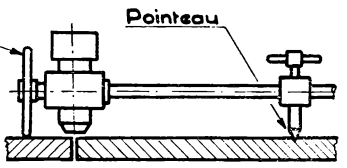



Fig. II-74 *bis*. — Guide-compas.

pour coupes de formes quelconques. Dès que la série est suffisante, il y a intérêt à faire un gabarit de forme pour guider le déplacement du chalumeau (fig. II-75).

Les buses sont fragiles et de leur bon état dépend en grande partie le bon fonctionnement du chalumeau. Il faut apporter beaucoup de soin à leur démontage, nettoyage et entretien.

**Méthode de découpage à la main.** — Le diamètre de l'orifice du jet de coupe et la pression d'oxygène augmentent avec l'épaisseur, et chaque constructeur fournit un barème, établi pour ses appareils.

Après montage du chalumeau et de la tête qui conviennent pour l'épaisseur, on allume la flamme de chauffe que l'on règle comme un chalumeau soudeur. L'ouverture du jet de coupe dérègle la flamme de chauffe et le réglage définitif doit être exécuté *le jet de coupe ouvert*.

Pour les tôles moyennes, le chalumeau est présenté sur le bord de la coupe comme l'indique la figure II-76. Lorsque la température

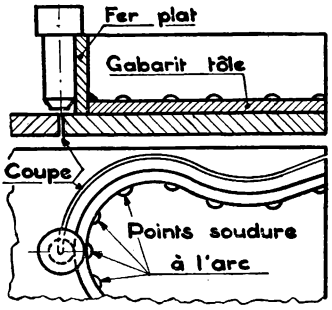



Fig. II-75. — Gabarit de forme.

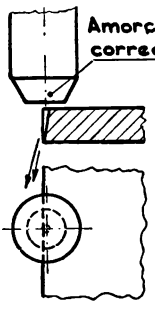



Fig. II-76.

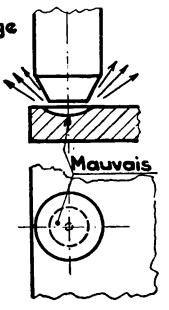



Fig. II-77.

a atteint 1 300 °C, le jet de coupe est ouvert rapidement et l'avance est amorcée. L'attaque doit se faire sur le bord de la tôle pour que l'oxyde soit évacué facilement par-dessous. Si le chalumeau est placé au-dessus de la tôle, il se forme une cuvette, et les gaz remontent avec l'oxyde vers la buse qui s'encrasse rapidement (fig. II-77). Pour que la coupe soit propre, *il faut que la vitesse d'avance soit régulière* et sans mouvements transversaux. D'après la forme des stries de découpage, il est facile de régler la vitesse d'avance (fig. II-78).

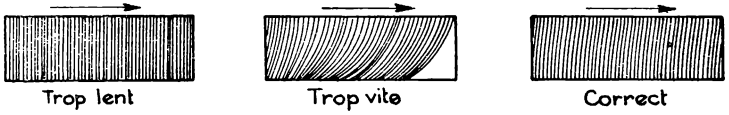



Fig. II-78.

Si la coupe se désamorce (avance trop rapide, présence d'oxyde, de peinture, etc.), on ferme le jet de coupe et on procède à un nouvel amorçage comme pour débuter.

Dans le cas d'une coupe fermée, on perce un trou pour amorcer.

Pour couper en ligne droite, on fixe sur la tôle, avec 2 presses, une règle contre laquelle le guide à roulettes est déplacé régulièrement. Un gabarit de forme remplace la règle pour les tracés quelconques, et pour les coupes circulaires, le compas suffit.

En cours de travail, l'oxyde doit être évacué avec les gaz sous la tôle. S'il remonte à la partie supérieure c'est que la coupe ne débouche pas. Ce défaut a pour cause une avance trop rapide, une pression d'oxygène insuffisante ou une buse trop faible. Un réamorçage en pleine coupe est toujours difficile et il faut s'attacher à ne pas dépasser la vitesse d'avance qui convient pour l'épaisseur de la tôle à couper.

La présence d'oxyde, de calamine, de peinture ou de corps étrangers quelconques, est toujours une gêne et il y a intérêt à mettre le métal à nu, sur les lignes de coupe, par piquage, meulage, etc.

Sur les tôles pailleuses ou feuilletées, il se produit des affouillements et des arrêts qui rendent souvent le découpage impossible et dans tous les cas très malpropre.

**Machines à découper.** — Ce sont de véritables machines-outils livrant des surfaces de coupe utilisées souvent sans retouches. Dans la plupart des modèles, les canalisations d'oxygène qui alimentent la

coupe et la chauffe sont indépendantes, et la tête du chalumeau, à buses interchangeables, est à la fois réglable en hauteur et inclinable pour les coupes en chanfrein.

***Machines semi-automatiques.*** — Le chalumeau est monté sur un petit chariot à 4 roues (fig. II-79) qui se déplace sur un chemin de roulement que l'on règle en position sur la tôle (coupes droites). En

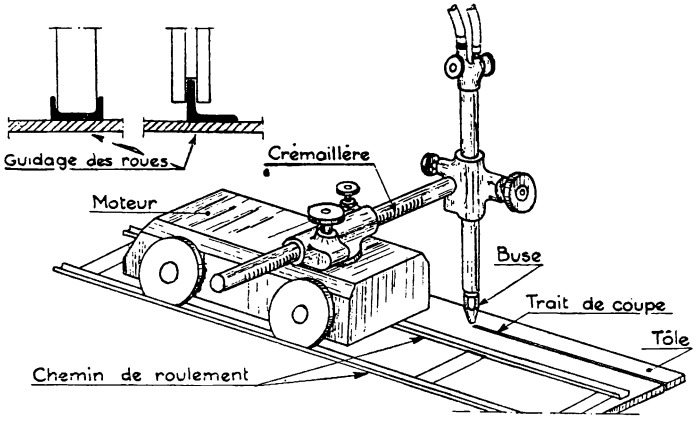



Fig. II-79. — Machine semi-automatique.

remplaçant les 2 roues arrière par un galet, on fait des coupes circulaires, autour d'un pointeau maintenu en place par une charge. L'avance du chariot est commandée, soit par un petit moteur électrique, soit par une turbine actionnée par l'oxygène de coupe, dans les deux cas à vitesse variable.

Il existe également pour les coupes droites ou en chanfrein des viroles et des tubes de moyens et gros diamètres, des chariots à adhérence magnétique et des montages spéciaux qui entraînent et guident le chalumeau autour du tube.

***Machines automatiques.*** — *Principe.* — Une table métallique comporte 2 chemins de roulement sur lesquels se déplacent 2 chariots portant une poutre légère (genre portique). Cette poutre est prolongée par le bras porte-chalumeau — en porte-à-faux hors de la table (fig. II-80) — qui se déplace perpendiculairement au chemin de roulement. La combinaison de ces 2 mouvements perpendiculaires (chariots croisés) permet de suivre tous les contours. Le moteur à vitesse variable et les organes de guidage sont solidaires du bras porte-chalumeau.

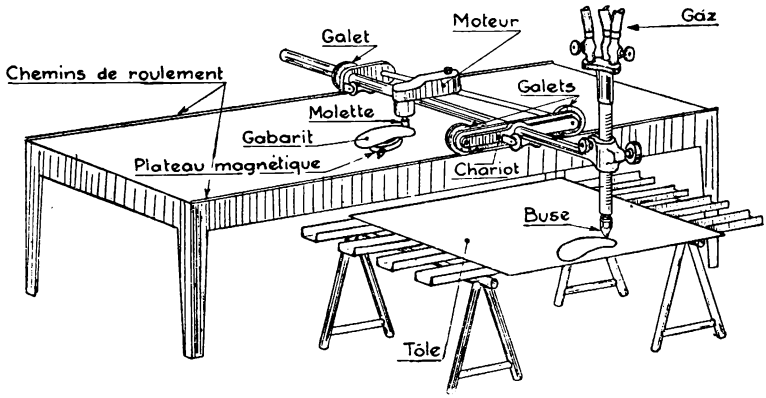



Fig. II-80. — Machine automatique à chariots croisés, type « Oxytome ».

Dans toutes les machines d'oxy-coupage, les têtes sont réglables en hauteur et inclinables et, pour les grandes coupes, maintenues à une hauteur constante au-dessus de la tôle, malgré les déformations de celle-ci.

***Guidage du chalumeau.*** — *Par molette striée.* — La molette — commandée par le moteur mis en route à l'ouverture du jet de coupe — entraîne l'ensemble (bras porte-chalumeau et chariot) en roulant sur la table. Bloquée à l'inclinaison convenable, elle fait des coupes droites ; avec un centre fixé sur la table par adhérence magnétique, on obtient des coupes circulaires, la molette étant débloquée.

GUIDAGE A LA MAIN. — On peut suivre tous les contours en orientant, à la main, la molette débloquée sur un tracé placé sur la table (fig. II-81).

A L'AIDE D'UNE CROIX LUMINEUSE. — Même principe que ci-dessus, mais la molette est orientée par l'intermédiaire d'un volant qui projette une croix lumineuse dont on maintient l'une des branches tangentes au tracé (fig. II-83).

Fig. II-81.

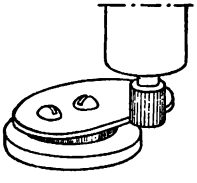


Fig. II-82.

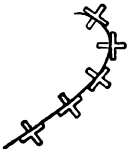


Fig. II-83.

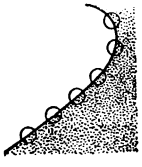


Fig. II-84.

AU TRACEUR ÉLECTRONIQUE. — Un cercle lumineux de petit diamètre suit les contours d'un dessin noir sur fond blanc, ou inversement. Une cellule photo-électrique, qui reçoit la lumière réfléchie, maintient — par orientation convenable de la molette — le flux lumineux constant, moitié sur le noir et moitié sur le blanc (fig. II-84). Dispositif le plus répandu.

Ces 2 dernières dispositions permettent de suivre des dessins sur papier, sans les altérer.

*Par molette magnétique.* — La molette roulant sur la table est remplacée par une molette cylindrique cannelée (fig. II-82). Celle-ci par sa rotation suit les contours d'un gabarit en tôle de 3 à 4 mm. C'est par adhérence magnétique que la molette est maintenue contre le gabarit, et que celui-ci est immobilisé sur la table.

***Machines spéciales.*** — Certaines machines ont des bras très longs qui peuvent porter jusqu'à 6 chalumeaux et plus, réglables et inclinables. En grosse chaudronnerie, et dans les chantiers navals, on utilise, pour les grandes coupes droites, des machines portiques qui se déplacent sur des chemins de roulement qui peuvent atteindre 40 à 50 m de longueur.

Sur ces machines, on peut couper simultanément les deux bords parallèles d'une tôle (ou de plusieurs tôles), ce qui équilibre les déformations ; en montant deux ou trois chalumeaux décalés sur la même tête, on coupe directement en chanfrein, soit en V, soit en X (fig. II-85).

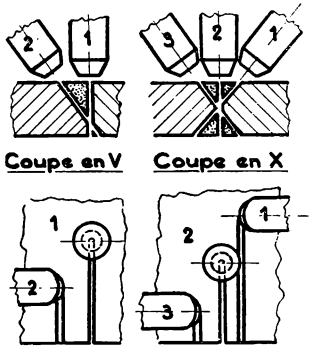



Fig. II-85. — Chanfreinage.

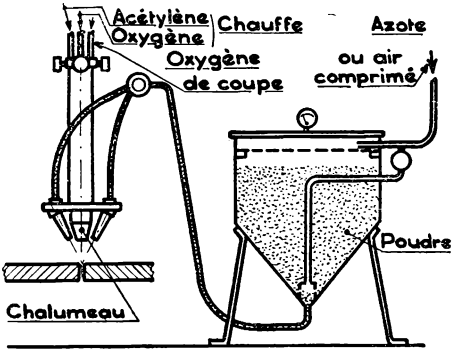



Fig. II-86. — Oxy-coupage à la poudre.

**Applications.** — Débit des tôles moyennes et épaisses d'acier en coupes droites et sinueuses (coupes extérieures ou intérieures) pour toutes les fabrications de chaudronnerie.

Découpage en série sur machines multi-têtes. — Chanfreinage des tôles avant soudage. — Préparation des éléments de bâtis de machines en acier laminé (tôles et profilés) avec raidisseurs et nervures — assemblés ensuite rapidement par soudage à l'arc — souvent sans retouche des coupes. — Fabrication de montages divers : montages d'usinage, de mise en place, de rivetage, de soudage, etc. — Débit de profilés et de tubes sur machines spéciales. — Dérivetage et gougeage avec têtes spéciales.

**Oxy-coupage à la poudre** (fig. II-86). — Le chalumeau classique de découpage ne coupe que les aciers non alliés ou faiblement alliés. Par addition de poudres dans le jet de coupe, on élargit le domaine d'application de ce procédé. Les poudres agissent par élévation de la température qui permet la fusion et la scorification des oxydes, et aussi par effet abrasif. On utilise des poudres de silice (sable fin), de fer et d'aluminium. Avec le *sable*, on coupe les aciers au nickel-chrome (jusqu'à 20 % Cr max.) et la fonte. La *poudre de fer* permet de couper, en plus de la fonte et des nickel-chrome, les alliages légers. En y ajoutant un peu de *poudre d'aluminium*, on découpe le nickel et ses alliages, et le cuivre.

## COUPAGE AU PLASMA

C'est un coupage par *fusion*, et non par oxydation. Un mélange de gaz (argon + hydrogène, généralement), soumis à l'action simultanée d'un arc électrique et d'un étranglement, par son passage dans un orifice refroidi, et de petit diamètre, voit sa structure atomique modifiée : ses atomes perdent un ou plusieurs électrons (ionisation) et il prend le nom de « plasma ». Sa température peut atteindre 20 000° C, et sa vitesse de sortie est extrêmement élevée. Le métal est fondu, puis chassé de la saignée par l'énergie cinétique du plasma.

L'arc dit « transféré », jaillit entre une électrode de tungstène, et la pièce à couper (fig. II-87) et la torche est refroidie énergiquement par une circulation

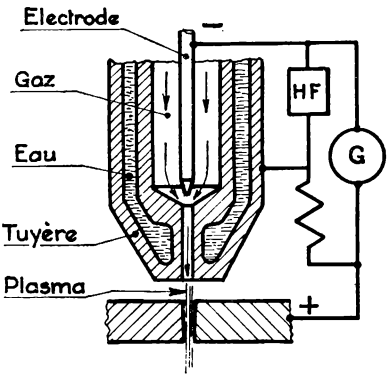



Fig. II-87. — Schéma du coupage au plasma.

d'eau. Le courant est fourni par un poste à redresseurs (voir soudage). Tension : 70 à 100 V, et intensité de 200 à 600 A, suivant l'épaisseur à couper. Un courant de haute fréquence, de faible intensité, alimente un arc pilote qui éclate entre l'électrode et la tuyère. Cet arc a pour rôles d'amorcer et de stabiliser l'arc principal.

Les saignées sont relativement larges avec des faces qui ne sont pas bien parallèles; par contre, les vitesses d'avance sont très élevées. Ce procédé coûteux est surtout utilisé pour les aciers inoxydables, les alliages légers, le cuivre et ses alliages : épaisseurs maximales de 100 à 150 mm.

CHAPITRE III

# LA MISE EN FORME

## GÉNÉRALITÉS

Par l'expression « mise en forme » on désigne toutes les opérations qui permettent d'obtenir des formes quelconques à partir d'une tôle plane.

Les surfaces formées se classent en 2 catégories nettement différentes : les surfaces développables et les surfaces non développables.

**Surfaces développables.** — Une surface développable est engendrée par une ligne droite (1). En posant une règle en un point quelconque d'une telle surface, on peut toujours trouver une position où la règle est en contact avec la surface, sur toute la longueur de celle-ci, depuis l'orifice d'entrée jusqu'à l'orifice de sortie.

Les génératrices d'un cylindre droit ou oblique, d'un cône, d'un tronc de cône droit ou oblique, sont des lignes droites (fig. III-1).

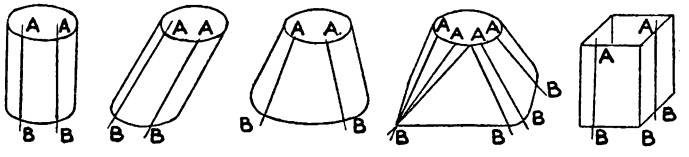



Fig. III-1. — Exemples de surfaces développables.
Les lignes *AB* (génératrices) sont des lignes droites.

(1) Cette condition est nécessaire, mais elle n'est pas suffisante pour caractériser une surface développable. Il faut, de plus, que toutes les tangentes à la surface, sur une même génératrice, appartiennent au même plan, qui est le plan tangent à la surface suivant la génératrice considérée. Il existe des surfaces — que l'on rencontre rarement dans la pratique — engendrées par des lignes droites (surfaces réglées gauches), et *non développables* : certains hélicoïdes en particulier (vis d'Archimède).

Il est toujours possible de réunir deux sections données, de formes quelconques, par une surface développable.

C'est par *cintrage* et par *pliage* que l'on obtient les surfaces développables. Celles-ci peuvent être remises à plat sans pliure ni déchirure et sans modification de surface ou d'épaisseur. Un cylindre, un tronc de cône, s'ouvrent facilement ; il suffit d'exercer un effort dans le sens inverse de celui qui a permis la déformation, pour que la tôle retrouve sa forme plane et ses dimensions primitives exactes. Pratiquement, les pliages suivant de faibles rayons sont difficiles à remettre parfaitement à plat.

**Surfaces non développables.** — Toute surface engendrée par une ligne brisée ou courbe n'est pas développable ; exemples : calotte sphérique, pavillon évasé, récipients à fond plat et bord cylindrique ou conique, cône de réduction avec bords, pelle emboutie, etc. (fig. III-2).

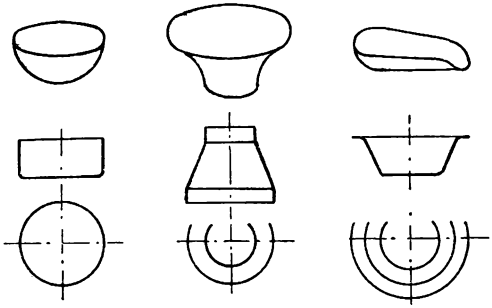


Fig. III-2. — Surfaces non développables. Génératrices courbes ou brisées.

Ces surfaces sont obtenues par *étirage*, *emboutissage* ou *rétreinte*, qui procèdent, soit par allongement de la tôle au détriment de l'épaisseur, soit par déplacement de métal. L'exécution de ces déformations présente des difficultés bien plus grandes que les précédentes (cintrage et pliage).

Il est pratiquement impossible de redonner à la tôle sa forme et ses dimensions initiales, sauf pour les faibles déformations. Une action dans ce sens est toujours accompagnée de modifications sensibles de surface et d'épaisseur, quand ce n'est pas de déchirure ou de pliure.

On peut observer que les surfaces ayant pour génératrices des lignes brisées (casseroles, cône de réduction) sont constituées par des surfaces qui, considérées séparément, sont développables, mais que l'ensemble ne l'est pas.

# MISE EN FORME
# DES SURFACES DÉVELOPPABLES

## LE DRESSAGE DES TÔLES

Le dressage des tôles est l'opération qui consiste à rendre une tôle plane. Le terme « planage » souvent utilisé pour désigner cette même opération sera réservé, ici, à un travail complémentaire de la mise en forme (voir planage).

Au premier abord, ce chapitre semblerait mieux à sa place dans le travail des tôles à plat. Mais le dressage des tôles se rattache à la mise en forme, tant par les méthodes, que par l'outillage utilisé (1).

Le dressage n'est nécessaire que lorsque les tôles sont employées planes sur toute leur surface ou en majeure partie : panneaux, grandes tôles pliées ou formées localement.

Presque toujours, il y a intérêt à utiliser des tôles livrées dressées par les aciéries, moyennant une plus-value. Ce choix sera guidé par diverses considérations : prix des tôles dressées, nature du travail à exécuter, outillage, main-d'œuvre dont on dispose, etc.

Toutes les déformations étudiées aux chapitres suivants peuvent se rencontrer seules ou réunies dans les tôles planes : pliage, cintrage, gauche, allongements localisés, situés au bord ou au milieu.

La première difficulté réside dans la détermination de la nature, de la position et de l'importance des déformations. Il s'agit ensuite de choisir les méthodes de correction appropriées et enfin, il faut, marteau en main, exécuter le dressage.

### Principe du dressage à la main.

Pour arriver à vaincre ces difficultés, une excellente méthode consiste à exécuter — dans une tôle plane — une déformation, puis sa correction ; on augmente progressivement le nombre et l'importance des déformations volontairement exécutées, et suivies des corrections appropriées.

(1) Le dressage est une véritable mise en forme dans un cas particulier et difficile (mise en forme de surfaces planes), et exécutée presque toujours par allongement.

***Première déformation type : « la cloque ».*** — Dans une tôle d'acier plane de 0,8 à 1 mm, de 500 à 600 mm de côté et sur un tas en acier (fig. III-3) on fait quelques passes circulaires de martelage à coup portant (1) de densité décroissante en s'éloignant du centre (fig. III-4). Dans la zone martelée, la tôle s'amincit légère-

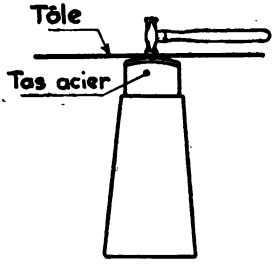



Fig. III-3.

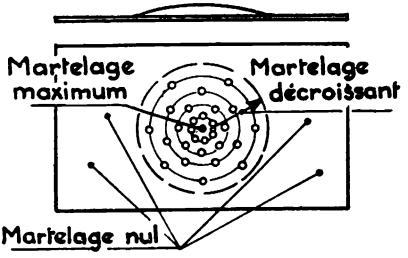



Fig. III-4. — Exécution d'une cloque.

ment et augmente de surface, mais elle est dans l'impossibilité de s'étendre en longueur et en largeur parce qu'elle est maintenue comme dans un cadre rigide par les bords non martelés.

Il se produit néanmoins une déformation qui a la forme d'une calotte sphérique peu profonde et qu'on appelle « cloque ». Si on appuie sur cette cloque dans le vide, elle passe alternativement d'un côté et de l'autre (fig. III-5) comme un fond de boîte à conserve. Il est bien évident que *plus on martèle sur la « cloque » à coup portant et plus elle « monte »*. Cette observation met le débutant à l'abri d'une faute commune qui consiste à frapper sur la bosse pour la faire disparaître.

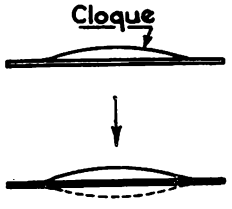



Fig. III-5.

Le remède le plus simple serait de refouler la tôle sur elle-même mais la rétreinte ou le refoulement d'une tôle mince, dans ces conditions, est pratiquement impossible, sauf pour le plomb, à l'aide du maillet, et dans une certaine mesure, pour l'aluminium et le cuivre recuits.

Puisqu'il n'est pas possible de refouler

(1) On peut frapper sur une tôle : a) *à coup portant :* juste à l'endroit où la pièce porte sur le tas (fig. III-3 et III-20) ; b) *à défaut* ou « à faux » : sur un tas ou un outil mais en dehors du — ou des — points d'appui (voir fig. III-27 et III-28) ; c) *en l'air*, c'est-à-dire sans support (tôles épaisses).

la cloque, la correction ne peut être obtenue que par l'*allongement de la tôle autour de la cloque.*

Il faut en principe que la tôle soit allongée sur toute sa surface, autant qu'elle l'a été au centre, où le martelage a été maximum. Ceci exige un allongement nul au centre, de densité croissante et partant du centre dans la zone allongée (cloque), maximum en régulier dans la zone plane non allongée primitivement (fig. III-6).

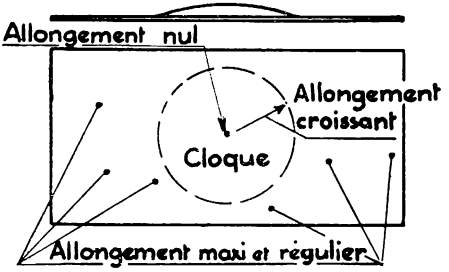



Fig. III-6. — Principe de la correction d'une cloque.

*Correction.* — Un martelage par passes concentriques serait, dans ce cas, le plus rationnel ; passes circulaires et coups de plus en plus serrés en s'éloignant du centre pour atteindre, au bord de la cloque, un maximum de densité qui ne varie plus ensuite jusqu'au bord de la tôle (fig. III-7). Cette méthode est difficile à appliquer correctement avec des déformations multiples, et sur des tôles rectangulaires.

Beaucoup d'auteurs conseillent les passes rayonnantes (fig. III-8), mais celles-ci, applicables aux tôles moyennes et épaisses, ne donnent pas facilement un martelage régulier. En effet, en partant du

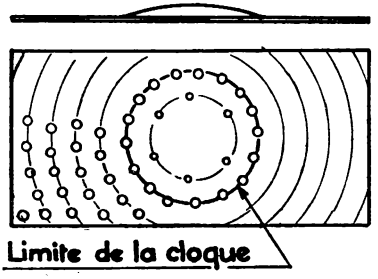



Fig. III-7. — Correction d'une cloque par passes circulaires.

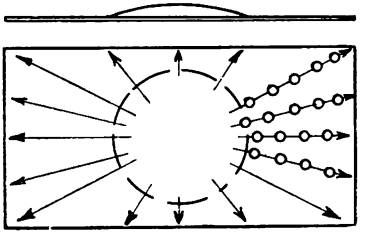


Fig. III-8. — Correction par passes rayonnantes.

centre, elles s'écartent (fig. III-8) et inversement elles se rapprochent si on part des bords (bords détendus, fig. III-9). On remédie à cet inconvénient en faisant des passes de plus en plus courtes et plus serrées vers le bord et exécutées dans l'ordre des chiffres de la figure III-10.

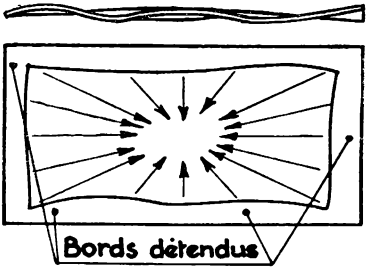



Fig. III-9. — Passes rayonnantes sur bords détendus.

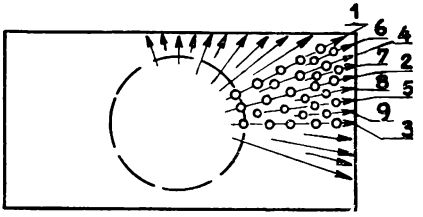



Fig. III-10. — Ordre d'exécution et position des passes rayonnantes.

Malgré tout, il est difficile d'obtenir la *régularité du martelage* qui est indispensable à l'exécution correcte du dressage des tôles minces.

La méthode qui, à cet égard, donne les meilleurs résultats est celle des passes parallèles. On exécute une série de passes parallèles en écartant régulièrement les passes et les coups de marteau sur toute la surface autour de la cloque (fig. III-11). Dans la cloque, on obtient l'allongement décroissant en espaçant davantage les coups de mar-

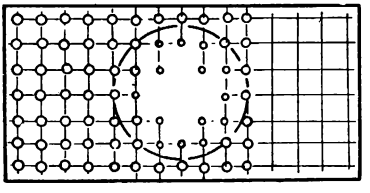


Fig. III-11. — Passes parallèles.

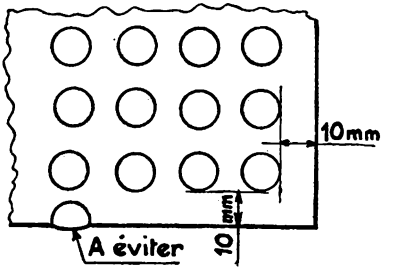



Fig. III-12.

teau et en frappant moins fort. S'il y a lieu, on fait ensuite une ou plusieurs passes en retournant la tôle, chacune d'elles étant faite suivant une direction perpendiculaire à la précédente. A chaque passe, la cloque doit s'aplatir.

*On doit surtout s'attacher à éviter le martelage localisé,* par superposition des passes et des coups de marteau.

Quelle que soit la méthode utilisée, il ne faut jamais frapper sur le bord de la tôle ; les passes sont arrêtées à 10 mm au moins du bord (fig. III-12).

***Deuxième déformation type : « le bord détendu ».*** — Sur la tôle redressée, si on martèle une zone sur le bord, il se forme comme une cloque coupée en deux (fig. III-13) et qui augmente d'importance avec l'intensité du martelage. On dit que le bord est *détendu ou voilé.*

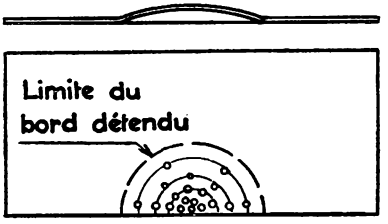



Fig. III-13. — Exécution d'un allongement du bord.

Tout comme la cloque, la zone allongée passe dessus et dessous alternativement. La tôle étant posée à plat sur une table, si on appuie sur la bosse, celle-ci se déplace en imprimant au bord un mouvement ondulatoire, et il est impossible de mettre le bord droit (fig. III-14).

Si la tôle est simplement cintrée, elle ne porte sur la table que sur les bouts. Par pression, on peut la faire porter sur toute la surface. Si dans cette position les bords sont droits, on peut en conclure qu'ils ne sont pas détendus (fig. III-15).

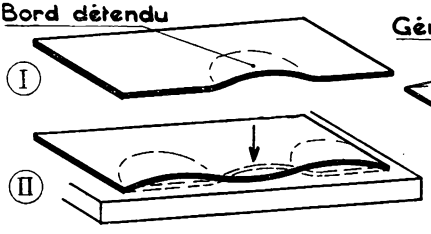



Fig. III-14. — Ondulation d'un bord allongé.

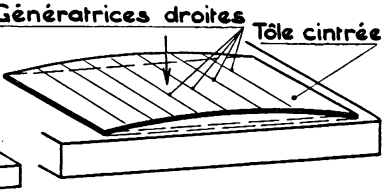



Fig. III-15. — Tôle cintrée.

Comme pour la cloque, la correction ne peut être obtenue que par allongement des surfaces non martelées primitivement.

On peut procéder par passes concentriques, ou rayonnantes, ou mieux par passes parallèles (fig. III-16). Tout ce qui a été dit pour la cloque est *applicable au bord détendu.*

**Exécution du dressage à la main.** — ***Tôles minces.*** — *Outillage.* — L'outillage est simple : un marteau à dresser, un maillet, un tas en acier, un marbre en fonte.

Les marteaux à dresser d'un poids de 1 kg environ, ont 2 têtes rondes (fig. III-17) d'un diamètre de 40 à 50 mm, l'une légèrement bombée, l'autre presque plate et le manche est dégorgé pour lui donner de l'élasticité. Les tas sont en acier traité (200 × 200 × 150 mm environ) ; leur face de travail est légèrement bombée

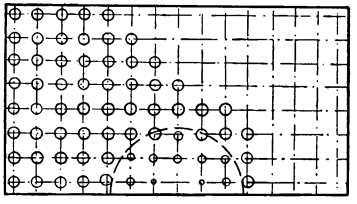


Fig. III-16. — Correction par passes parallèles.

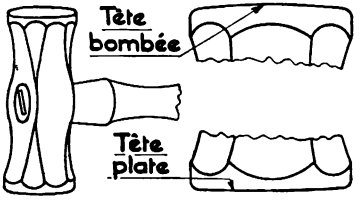



Fig. III-17. — Marteau à dresser.

(fig. III-17). On n'utilise jamais un marteau très bombé qui marque et emboutit la tôle. Lorsqu'on veut allonger plus énergiquement, on travaille sur un tas plus rond, mais toujours avec *un marteau aussi plat que possible. Ceci est valable pour tous les travaux de forme.*

Une table ou un marbre de même hauteur que le tas, supporte la tôle qui est déplacée par l'ouvrier à chaque coup de marteau, pour être présentée sur le tas à l'endroit précis à allonger (fig. III-18). Les dimensions réduites du tas permettent de frapper à coup portant en n'importe quel point de la tôle.

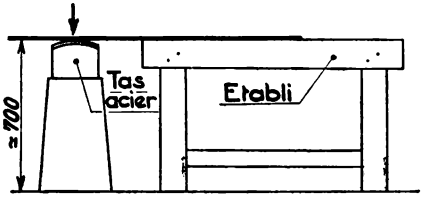



Fig. III-18. — Tas à dresser et table-support.

Fig. III-19. — Marbre « bombé » par le martelage.

Les marbres sont des tables en fonte rabotée, dont les dimensions (2 m × 1 m le plus couramment) peuvent atteindre dans les gros modèles 5 à 6 m et plus en longueur, avec une largeur de 1,5 à 2 m.

Malgré leur forte épaisseur de 100 à 200 mm, ils ont l'inconvénient de se bomber sous l'action du martelage qui allonge uniquement la face supérieure (fig. III-19). On remédie à ce défaut par retournement avant que la déformation ne soit trop accusée, ou mieux par rabotage.

Sur un marbre, il n'est pas possible de dresser proprement les tôles minces. La tôle ne porte pas partout et on frappe parfois à défaut.

Avec un morceau de bois tenu dans la main gauche, le dresseur appuie sur la tôle pour la faire porter sur le marbre, car un coup à défaut l'emboutit. Même à coup portant, le marteau, qui est en acier rentre dans la fonte, moins dure, et marque la tôle, tandis que sur un tas en acier, le marteau ne marque pratiquement pas.

*Comme pour tous les travaux de martelage*, le manche du marteau doit être tenu bien serré dans la main fermée et le déplacement du marteau *suivant un arc de cercle* (fig. III-20) *est obtenu par l'articulation du poignet et du coude.*

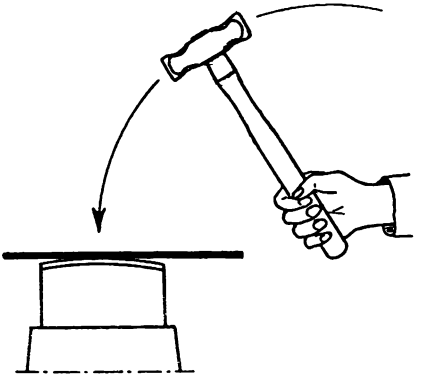


Fig. III-20. — Tenue du marteau.

*Pratique du dressage.* — Avant d'aborder son travail, le dresseur doit reconnaître les déformations et les situer exactement. Il peut hésiter, d'autant plus qu'aux déformations par allongement, s'ajoutent souvent des déformations par cintrage.

Après cisaillage, les tôles présentent parfois des déformations des bords et souvent du gauche. Les bords cintrés dans les deux sens sont

redressés au maillet sur la « carre » (1) ronde d'un marbre. On rabat le bord en exécutant une légère déformation inverse que l'on corrige ensuite sur le marbre (fig. III-21).

Le gauche, qui est courant dans les bandes étroites, est corrigé par martelage à défaut ; la tôle étant placée comme l'indique la figure III-22, le coup est donné à une distance de 10 à 30 mm de l'arête du marbre suivant l'épaisseur. A chaque coup de marteau, la bande est déplacée parallèlement à elle-même, dans le sens indiqué par la flèche.

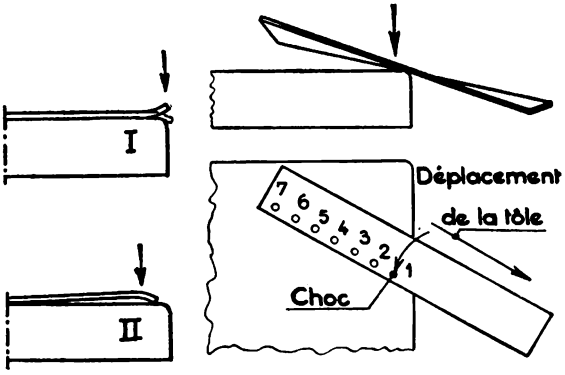



Fig. III-21.

Fig. III-22. — Dégauchissage d'une tôle.

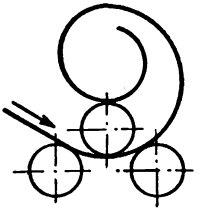


Fig. III-23.

Les grandes tôles sont roulées dans une machine à cintrer alternativement d'un côté et de l'autre à des rayons d'autant plus faibles que les déformations sont plus importantes (fig. III-23).

La tôle remise à plat, par desserrage des rouleaux, est alors placée sur une table ou sur un marbre. En levant les coins les uns après les autres et en appuyant au milieu on fait apparaître les cloques dont on marque le contour à la craie. Les allongements des bords sont décelés en appuyant sur les bosses qui se déplacent en faisant onduler le bord. On les marque également d'un trait de craie.

La figure III-24 donne un exemple de déformations multiples. Par passes concentriques, il est difficile de délimiter exactement la ligne de séparation des différentes passes. Cette méthode ne convient

(1) Par ce terme, on désigne les arêtes des outils et des pièces formées : exemple : la carre d'un marteau, d'un tas, d'un collet, etc.

que pour les déformations simples. Les passes rayonnantes sont plus faciles à exécuter, mais elles ne donnent pas la régularité indispensable.

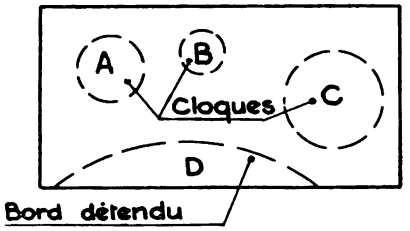



Fig. III-24. — Déformations multiples.

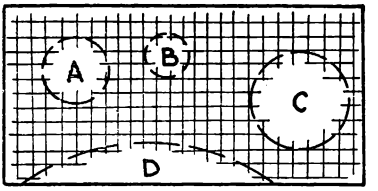



Fig. III-25. — Correction par passes parallèles.

La méthode des passes parallèles est préférable. On en exécute une première série sans toucher aux zones trop allongées (fig. III-25). Si c'est nécessaire on fait une deuxième série de passes suivant une direction perpendiculaire et ainsi de suite jusqu'à la correction parfaite.

Quelle que soit la méthode utilisée, à chaque passe l'importance des déformations doit diminuer. Entre chaque série de passes, on observe l'avancement du travail en retournant la tôle, et le cas échéant, on marque les déformations nouvelles souvent faites par maladresse ou irrégularité de martelage.

La finition est exécutée « en l'air ». La tôle est serrée par un coin dans un étau (fig. III-26) et on frappe avec un petit marteau — de 0,500 kg environ — en portant coup derrière avec une table à main en acier.

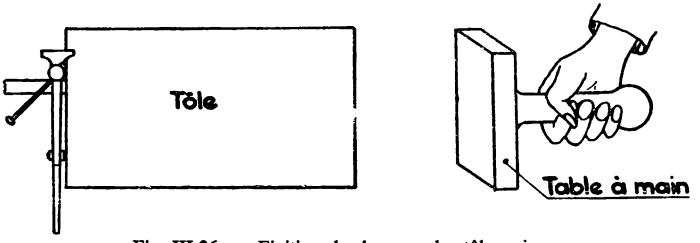



Fig. III-26. — Finition du dressage des tôles minces.

*Tôles moyennes et épaisses.* — Au-dessus de 2 à 3 mm, on utilieà les marbres ; il ne peut être question de déplacer une tôle de 50 s 100 kg, et plus, sur un tas. Les marteaux sont les mêmes que pour

les tôles minces mais plus lourds. Pour les tôles épaisses, l'ouvrier est aidé par un ou plusieurs manœuvres qui se servent de marteaux à frapper devant.

Presque toujours, le travail est limité à du dégauchissage ou du cintrage, exécuté à défaut en dehors du marbre (fig. III-27 et III-28) ou à l'aide d'un ou plusieurs fers plats ou demi-ronds.

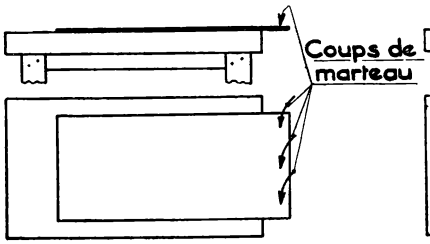



Fig. III-27.
Dressage d'une tôle épaisse.

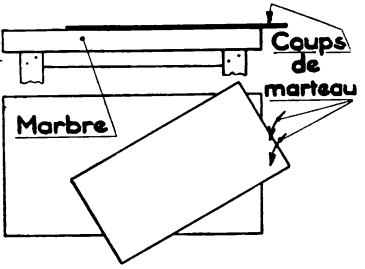



Fig. III-28.
Dégauchissage d'une tôle épaisse.

Les tôles épaisses sont aussi dressées par allongement à coup portant de la partie concave, à la panne ou à la table de marteau (fig. III-29), ou par chaudes de retrait superficielles, exécutées avec un chalumeau puissant sur la partie convexe (fig. III-29).

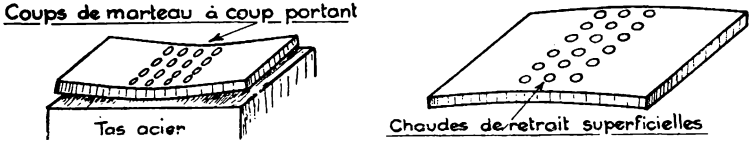



Fig. III-29. — Dressage des tôles épaisses.

***Tôles de cuivre, laiton, alliages légers, aciers inoxydables.*** — Le cuivre et les alliages légers écrouis sont très rarement dressés. A l'état recuit, on les dresse au martinet ou à la machine à rouleaux. A défaut de machine on les dresse au maillet ou à la batte en bois sur marbre, ou sur tas acier avec des battes en acier également (fig. III-30).

Tous ces métaux ont l'inconvénient de se rayer facilement, surtout l'aluminium. On évite de traîner les feuilles sur les tables et les outils et on ne travaille qu'avec des outils polis.

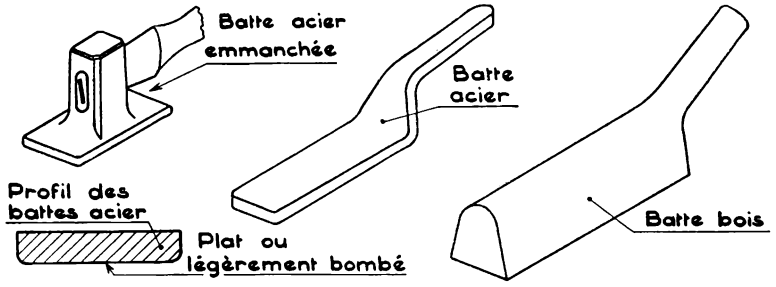



Fig. III-30. — Battes diverses.

**Dressage à la machine.** — ***Au martinet.*** — Les plus utilisés sont les martinets, dits atmosphériques ou pneumatiques, qui fonctionnent comme de petits marteaux-pilons auto-compresseurs.

*Fonctionnement.* — Un moteur fait tourner un arbre à vilebrequin *A* avec volant *V*. Sur le vilebrequin est montée une bielle *F* qui entraîne un piston *P* dans un cylindre *C* (fig. III-31). Dans ce même cylindre se déplace le marteau *M*. La liaison entre le piston et le marteau est pneumatique. Lorsque le piston monte, il crée, à l'intérieur du cylindre, une dépression qui aspire le marteau (montée). A la descente du piston, la compression projette le marteau sur l'enclume. Vitesse : 350 coups à la minute environ. On peut faire varier facilement la puissance du choc en agissant sur le régulateur *R*.

Le marteau est presque plat et le martinet possède un jeu d'enclumes *E* de formes diverses et interchangeables rapidement (fig. III-32). La chabotte *D* est montée sur un billot de bois *B*. Le martinet est fixé à une potence ou à la char-

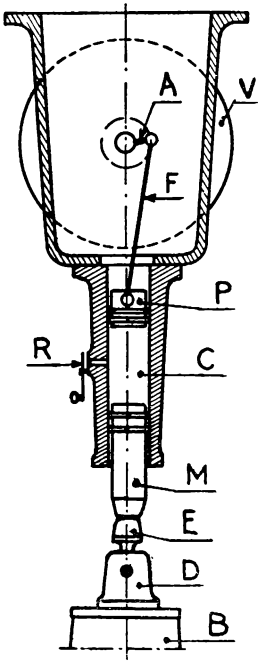



Fig. III-31. — Schéma d'un martinet pneumatique.

pente de l'atelier pour permettre le passage des tôles de grandes dimensions (fig. III-33).

*Pratique du dressage.* — On dresse les tôles minces jusqu'à 2 et 3 mm suivant le même principe qu'à la main sur le tas par passes parallèles. *Le déplacement uniforme et continu de la tôle est indispensable,* pour la régularité du martelage. Un ralentissement — ou pire, un arrêt — a pour effet d'allonger localement et très rapidement. Comme à la main, on ne frappe jamais sur le bord même : pour cela, on engage et on dégage la tôle d'un mouvement rapide sans arrêter le martinet.

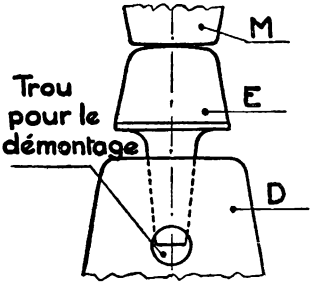



Fig. III-32. — Enclume et chabotte de martinet.

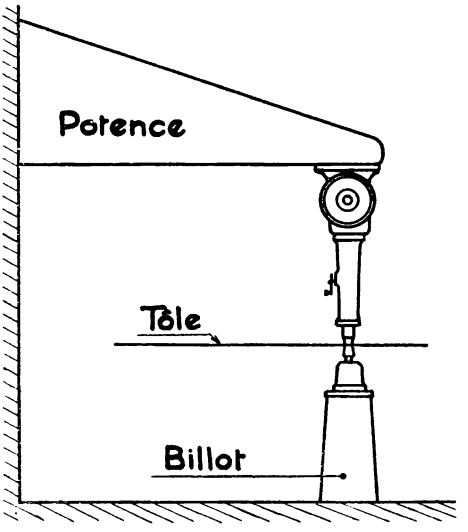



Fig. III-33.
Martinet monté sur potence.

Les enclumes et les marteaux sont polis aussi parfaitement que possible pour le dressage des métaux non ferreux. Avec l'aluminium il est nécessaire de graisser l'enclume ; sinon il y a adhérence de grains d'aluminium qui rayent la tôle.

***A la machine à rouleaux.*** — *Description.* — Les organes essentiels de ces machines sont deux trains de rouleaux, en nombre variable, *non superposés,* mais disposés comme l'indique les figures III-34 à III-36.

Tôles épaisses : 5 à 7 rouleaux, ⌀ : 200 à 400 mm.
Tôles moyennes : 9 à 15 rouleaux, ⌀ : 100 mm (environ).
Tôles minces : 17 à 23 rouleaux, ⌀ : 25 mm minimum.

Des contre-rouleaux fixés sur des poutres robustes supportent les rouleaux durant le dressage, et la tôle est reçue sur des tables, de part et d'autre de la machine, qui travaille dans les deux sens à l'aide d'un inverseur de marche.

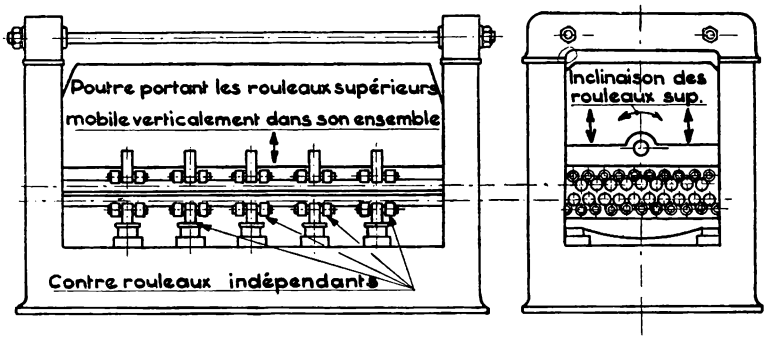



Fig. III-34. — Schéma d'une machine à dresser à rouleaux.

Le train de rouleaux supérieur peut monter ou descendre dans son ensemble, pour faire varier l'importance de l'ondulation et, dans certaines machines, il peut basculer, à droite et à gauche (fig. III-35).

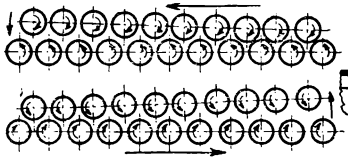


Fig. III-35.
Inclinaison des rouleaux supérieurs.

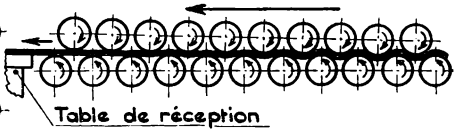



Fig. III-36. — Déformations de la tole.

Dans les grosses machines, le train de rouleaux inférieur est fixe ; par contre, pour les tôles moyennes et minces, les contre-rouleaux inférieurs, indépendants et réglables en hauteur, peuvent déformer les rouleaux, ce qui permet d'augmenter ou de diminuer le taux d'allongement, soit au milieu, soit sur les bords (voir fig. III-42 à III-45).

*Principe de fonctionnement.* — Si on cintre une tôle cloquée au milieu (fig. III-37) ou détendue sur les bords (fig. III-38), les génératrices du cylindre ne sont pas droites, après cintrage, dans les zones déformées.

Avec des rouleaux de gros diamètre et espacés (fig. III-39), les fibres détendues ont la possibilité de « décoller » des rouleaux (traits interrompus), ce qui laisse les déformations intactes après le passage dans la machine. Si au contraire, les rouleaux sont de petit diamètre et rapprochés (fig. III-40), les zones détendues ne peuvent plus se loger « décollées » entre les rouleaux (1).

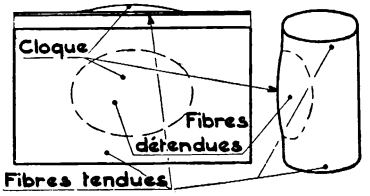



Fig. III-37.

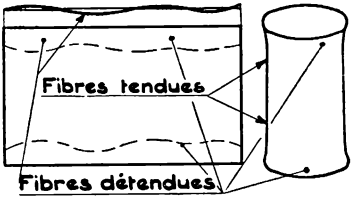



Fig. III-38.

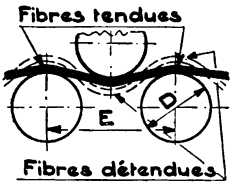



Fig. III-39.

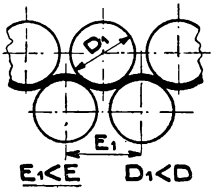



Fig. III-40.

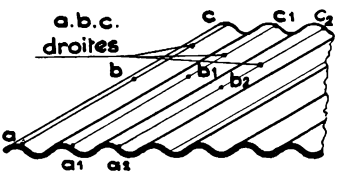



Fig. III-41.

La tôle est contrainte de prendre la forme d'une surface cylindrique, et par suite, développable (génératrices droites et parallèles sur un profil ondulé, fig. III-41), ce qui tend à la dresser, en exerçant un effort de traction sur les zones tendues et de compression dans les zones détendues.

Par descente du train de rouleaux supérieurs on augmente la déformation jusqu'à dépassement de la limite élastique de la tôle. Mais celle-ci sort cintrée par l'action du dernier rouleau, ce qui oblige à repasser la tôle une ou plusieurs fois en diminuant le serrage.

On peut remédier à cet inconvénient en ajoutant de part et d'autre de la machine, des rouleaux redresseurs. Mais les machines à train supérieur inclinable sont d'un meilleur rendement. Les premiers rouleaux déforment fortement (fig. III-36), et les suivants redressent

(1) Les déformations ont été volontairement exagérées dans tous les croquis.

progressivement la tôle, qui sort plane souvent en un seul passage.

Même avec ces améliorations, les tôles minces se dressent souvent mal, et certains constructeurs ont ajouté un dispositif de déformations des rouleaux inférieurs, à l'aide de contre-rouleaux réglables en hauteur. Par leur pression ou leur effacement, on localise l'ondulation — et par suite l'étirage — soit sur les bords (fig. III-42), soit

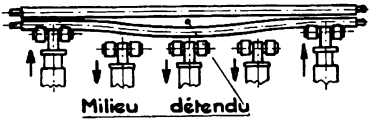



Fig. III-42.

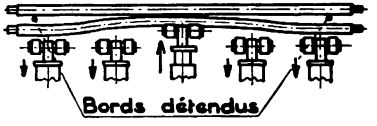



Fig. III-43.

au milieu (fig. III-43), soit sur un bord seulement (fig. III-44), soit enfin, au milieu, et sur les bords extrêmes (fig. III-45).

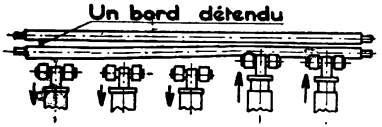



Fig. III-44.

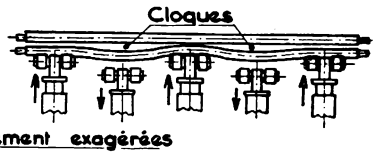



Fig. III-45.

A défaut de rouleaux déformables, on obtient des allongements localisés, en plaçant sur la tôle, aux endroits à allonger, des bandes de tôle mince ($\approx 60 \times 0{,}8$).

Le travail à la machine est la véritable méthode industrielle de dressage des tôles. Toutefois, ces machines coûteuses ne peuvent s'amortir que pour de grosses productions.

Les tôles de cuivre et d'alliages légers sont dressées sur des machines à rouleaux polis. A défaut, on dresse les tôles entre 2 feuilles de tôle mince polies de même nature que celle à dresser ou même entre 2 feuilles de papier.

***Machines à dresser par traction.*** — Dans les aciéries, on utilise aussi des machines à dresser par traction. La tôle, pincée entre deux mâchoires, sur les petits côtés, est soumise à un effort de traction qui dépasse la limite élastique et jusqu'à ce que la tôle soit bien dressée.

***Dressage par chaudes de retrait.*** — En chauffant rapidement dans une tôle une petite surface, celle-ci ne peut pas s'allonger parce qu'elle est bridée par les parties voisines qui sont froides. Elle se refoule, et, au refroidissement, se retrouve plus courte qu'avant le chauffage (voir l'explication fig. IV-109).

On localise la zone trop longue, et on fait une série de chaudes de retrait très régulièrement espacées et en nombre variable suivant l'importance de la déformation (fig. III-46). On laisse refroidir avant d'apprécier le résultat et on multiplie les chaudes jusqu'à disparition des déformations.

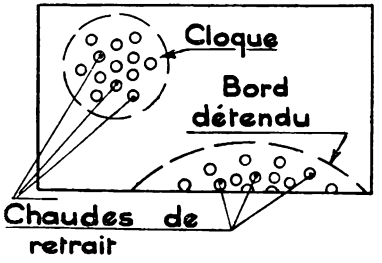



Fig. III-46. — Dressage d'une tôle par chaudes de retrait.

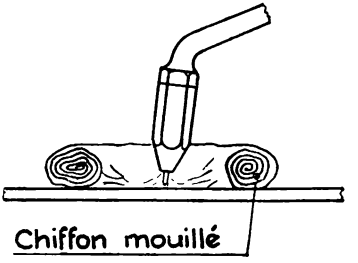



Fig. III-47. — Exécution d'une chaude de retrait.

Pratiquement, on utilise un chalumeau oxy-acétylénique relativement puissant et on entoure le point de chauffage avec un chiffon mouillé pour maintenir froides les parties voisines (fig. III-47).

Les tôles minces se gonflent au moment du chauffage, et il est nécessaire de refouler la cloque ainsi formée, au maillet sur un tas acier ou sur une table à main. Les chaudes de retrait sont, par ailleurs, peu efficaces pour le cuivre et l'aluminium dont la bonne conductibilité s'oppose à la localisation du chauffage.

## LE CINTRAGE

On a vu, plus avant, que l'on forme, par cintrage, *les surfaces développables* (surfaces cylindriques, coniques et quelconques).

**Développé d'une tôle cintrée.** — Le cintrage impose au métal des déformations plastiques, de sens inverse ; étirage et refoulement qui s'équilibrent de part et d'autre de la fibre neutre 0 (fig. III-48)

qui n'est ni étirée, ni refoulée. Les fibres + 1, + 2, + 3 et + 4 sont étirées et les fibres — 1, — 2, — 3 et — 4 sont refoulées. On peut remettre à plat, puis cintrer à nouveau, dans le même sens, ou en sens inverse à des rayons différents, sans modifier la longueur de la fibre moyenne *a.b.c.* (fig. III-49). Dans les 2 sens la déformation est d'autant plus importante que la fibre est plus éloignée de la fibre neutre.

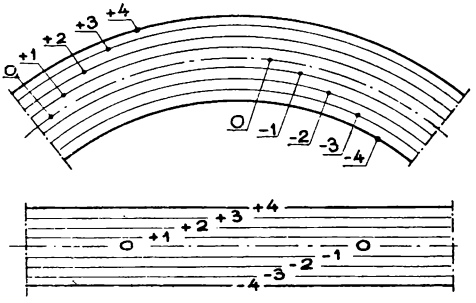



Fig. III-48.

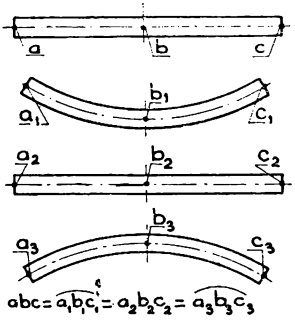



Fig. III-49.

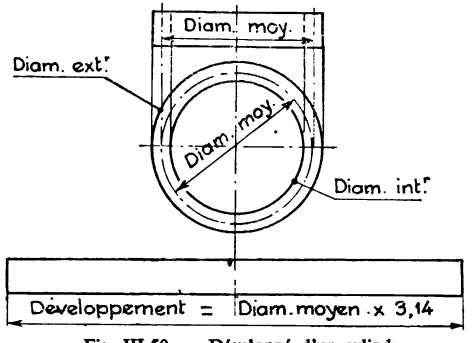



Fig. III-50. — Développé d'un cylindre.

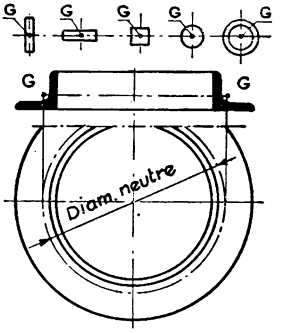



Fig. III-51.

Les déformations plastiques augmentent : *a)* lorsque l'épaisseur de la tôle augmente ; *b)* lorsque le rayon de cintrage diminue.

Pour les tôles, la fibre neutre est située à mi-épaisseur (1) et on mesure le développement sur la ligne moyenne.

(1) La fibre neutre passe par le centre de gravité *G* de la section. *G* est situé au centre de symétrie pour le carré, le rectangle (tôles), le rond, le tube, etc. Mais il faut rechercher sa position pour les profils comme les cornières, les demi-creux, etc. (fig. III-51).

Développement d'un cylindre = diamètre moyen × 3,14.
Diamètre moyen = diamètre intérieur + épaisseur.
Diamètre moyen = diamètre extérieur — épaisseur (fig. III-50).

**Cintrage à la main.** — ***Tôles minces.*** — *Brisage de la tôle.* — Avant de cintrer à la forme définitive, on brise la tôle surtout pour les aciers. Faute de prendre cette précaution, la tôle se casse en formant une succession de petits plis et de plats que l'on appelle des « côtes ». Pour briser la tôle, on la cintre alternativement d'un côté et de l'autre en diminuant progressivement le rayon de cintrage, puis on remet à plat. Ce travail se fait sur une machine à cintrer, mais il est possible de briser à la main sur une bigorne ou un chevalet (fig. III-52). Lorsque la tôle est très mince, on glisse celle-ci sur le tas comme l'indique la figure III-53, sur les 2 faces de la tôle.

Fig. III-52. — Brisage d'une tôle à la main.

Si le métal est poli, l'outil est garni de chiffons pour éviter les rayures.

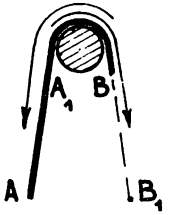



Fig. III-53. — Brisage d'une tôle très mince.

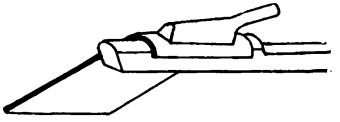


Fig. III-54. — Amorçage des extrémités.

*Méthode de cintrage.* — On commence toujours par les extrémités que l'on amorce au maillet ou à la batte en bois (fig. III-54). A l'aide d'un gabarit de cintrage, au rayon intérieur, on contrôle la régularité du travail. On cintre par pression à la main, de part et d'autre d'un chevalet ou d'une bigorne, en glissant la tôle sur l'outil et en progressant de chaque bord vers le milieu.

La figure III-55 indique les formes intermédiaires successives. Pour procéder au réglage définitif, il est préférable de cintrer un peu trop et d'ouvrir au maillet à coup portant en arrondissant.

Les surfaces coniques ou de formes quelconques sont cintrées sur des bigornes coniques, et le réglage se fait avec 2 gabarits, un pour chaque extrémité.

Quelle que soit la forme on doit s'attacher à maintenir les génératrices dans l'axe de l'outil ; sinon la pièce prend du gauche (fig. III-56) qui est difficile à corriger lorsque la pièce est de faible diamètre et de grande longueur.

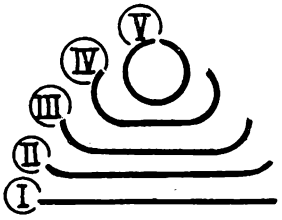



Fig. III-55.

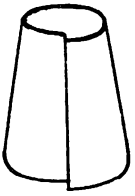


Fig. III-56.

On garnit de chiffons les bigornes pour cintrer les métaux polis. Mais on ne doit jamais frapper sur un outil ainsi protégé, avec un maillet, celui-ci marquerait la tôle : on frappe à coup portant sur l'outil poli.

***Tôles moyennes et épaisses.*** — On travaille entre 2 rouleaux ou dans un rail à boudin avec un marteau à cintrer (fig. III-57).

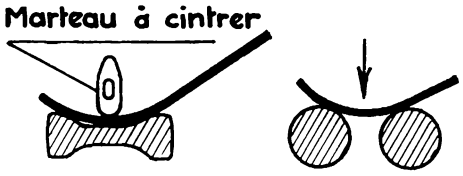



Fig. III-57. — Cintrage à la main de tôles épaisses.

Comme pour les tôles minces, on amorce et on règle les extrémités, puis on approche le milieu de part et d'autre, en cintrant bien suivant les génératrices, qu'il est indispensable de tracer à l'intérieur surtout pour les formes coniques ou quelconques. Le gauche est d'autant plus difficile à faire disparaître que la tôle est plus épaisse.

Il y a avantage à cintrer plutôt plus que moins, car au réglage la tôle s'ouvre plus facilement qu'elle ne se ferme, en raison des « contraintes résiduelles » (voir p. 275) laissées par le cintrage, et aussi parce qu'il est plus facile de frapper de l'extérieur que de l'intérieur.

Si la tôle est épaisse, pour ouvrir on frappe « à défaut » ou « en l'air ».

**Cintrage à la machine.** — ***Outillage.*** — Les machines les plus répandues sont à *rouleaux*, qui sont au nombre de trois ou quatre, suivant les modèles. Les bâtis — en acier moulé ou laminé soudé à l'arc — supportent les paliers des rouleaux (fig. III-58), les glissières des paliers mobiles, et les organes de commande mécanique, avec inverseur de marche (commande manuelle dans les petits modèles seulement).

Dans les machines pour moyennes, et surtout fortes épaisseurs, des transmissions avec cardans, sont nécessaires pour entraîner en rotation, les arbres mobiles en hauteur.

Pour les tôles épaisses, les trois rouleaux sont souvent tous moteurs, pour garantir l'entraînement de la tôle et un système à friction est intercalé dans la commande, afin de compenser les différences de vitesses, des rouleaux inférieurs, et du rouleau supérieur.

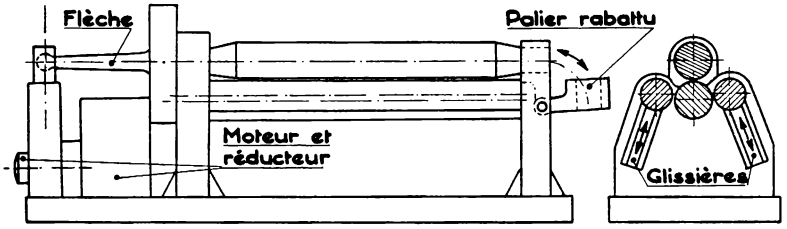



Fig. III-58. — Schéma d'une machine à cintrer à 4 rouleaux.

Pour les travaux courants les rouleaux ont 2 m à 3 m de longueur, mais ils peuvent atteindre une dizaine de mètres, ce qui exige des rouleaux d'appui qui s'opposent à la flexion des rouleaux entraîneurs et cintreurs.

Toutes les machines possèdent un dispositif d'effacement de l'un des paliers pour le dégagement des viroles fermées. Le rouleau supérieur est prolongé par une flèche (fig. III-58) qui, par la pression d'une vis, ou d'un vérin, permet de « soulager » le rouleau et de le mettre en porte-à-faux pour dégager le palier basculant.

L'installation d'une grosse machine est complétée par des appareils de levage : palan sur poutre ou sur potence, pont roulant, etc. Pour les viroles de grand diamètre, on utilise des béquilles (fig. III-59) et aussi des rouleaux supports réglables en hauteur (fig. III- 59*bis*) afin d'éviter la déformation des viroles par flexion, pendant le cintrage.

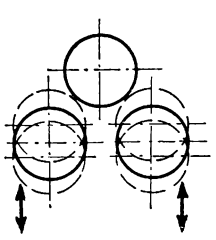


Fig. III-58 *bis*.

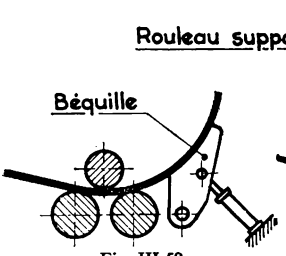



Fig. III-59.

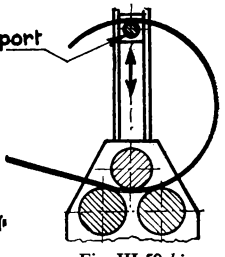



Fig. III-59 *bis*.

***Disposition des rouleaux :***

*Machines à trois rouleaux, type pyramidal* (fig. III-60). — Les rouleaux *A* et *B* sont moteurs, et ils tournent dans le même sens. Dans la plupart des machines, leurs paliers sont fixes, et c'est le rouleau supérieur *C*, non moteur (parfois moteur), qui se déplace verticalement, pour faire varier le rayon de cintrage. Dans certains modèles, ce sont les rouleaux *A* et *B* qui sont mobiles en hauteur (fig. III-58 *bis*) pour le cintrage; cette disposition permet l'amorçage.

*Machine à trois rouleaux, type planeur* (fig. III-63 et III-64). — Les rouleaux entraîneurs *A* et *B* sont superposés et le rouleau *A*, par son déplacement vertical, permet de serrer sur la tôle. C'est le rouleau *C* qui, par son déplacement sur des glissières obliques, règle le rayon de cintrage.

*Machines à quatre rouleaux* (fig. III-65), type planeur ci-dessus, complété par un quatrième rouleau *D*, qui permet le travail symétrique de chaque côté de la machine.

*Machine à trois rouleaux asymétriques* (fig. III-66 à III-68). — Les paliers des deux rouleaux inférieurs sont mobiles dans des glissières obliques et le rouleau supérieur peut se déplacer horizontalement.

***Méthode de cintrage.*** — *Brisage* (voir brisage à la main). — Cintrage à la machine avec retournement, une ou plusieurs fois ; pour tôles minces acier surtout.

***Amorçage ou croquage.*** — Dans toutes les machines à rouleaux, le cintrage laisse aux deux extrémités une partie droite — ou méplat (fig. III-60) — que l'on fait disparaître par l'amorçage.

1° *Sur type pyramidal.* — Si la tôle est mince, on pince l'extrémité de la tôle entre deux rouleaux (fig. III-60 *bis*) et on cintre par pression, à l'aide d'une pièce de bois. Pour les tôles épaisses, on amorce au marteau (fig. III-61).

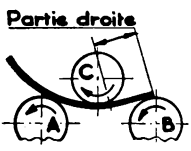



Fig. III-60.

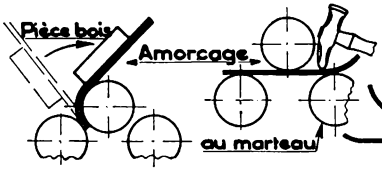



Fig. III-60 *bis*.

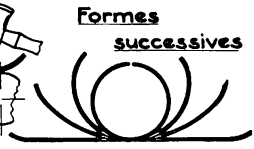



Fig. III-61.

Fig. III-62.

2° *Sur type planeur.* — La tôle pincée entre les rouleaux *A* et *B* (fig. III-63) est amorcée par la montée du rouleau cintreur *C* ; il faut retourner la tôle pour amorcer l'autre bord.

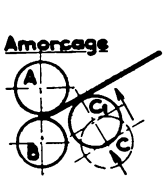



Fig. III-63.

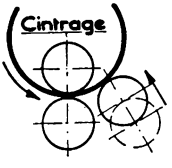



Fig. III-64.

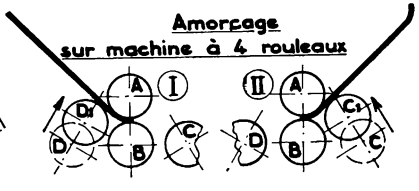



Fig. III-65.

3° *Sur machine à quatre rouleaux.* — Comme sur type planeur, mais le quatrième rouleau évite le retournement de la tôle (fig. III-65 I et II).

4° *Sur machine à trois rouleaux asymétriques.* — L'amorçage se fait *après cintrage* de la virole, par le déplacement horizontal du rouleau supérieur (fig. III-68), vers un bord (II et III), puis vers l'autre (IV et V).

Fig. III-66.

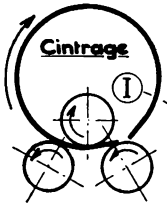



Fig. III-67.

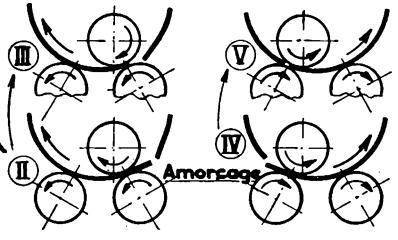



Fig. III-68.

5° *A la presse.* — Avec un outillage classique de pliage sur presse plieuse, on peut préparer les amorces par déplacements successifs (fig. III-69). Un outillage de forme (rayon plus petit pour prévenir l'effet de ressort) sur presse-plieuse ou sur presse spéciale donne les meilleurs résultats (fig. III-70).

Sauf dans le dernier cas ci-dessus, il est presque toujours nécessaire de régler les amorces que l'on prépare plus fermées que le rayon demandé ; par martelage à coup portant (fig. III-71) on règle au gabarit, par ouverture.

Fig. III-69.

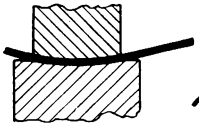


Fig. III-70.

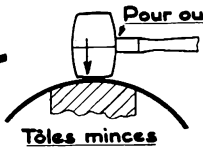



Fig. III-71.

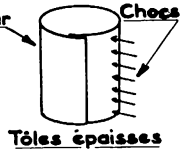



Fig. III-72.

*Cintrage.* — Quel que soit le type de machine, on peut cintrer en une seule fois ; mais il est préférable de cintrer en plusieurs passes (fig. III-62), pour obtenir un cylindre plus rond.

Avant chaque passe, il est prudent de bien dégauchir le bord de la tôle avec le contour apparent du cylindre supérieur, afin d'éviter le gauche.

On contrôle l'avance du travail à l'aide de gabarits et on tient la virole plutôt plus fermée que plus ouverte ; il est, en effet, plus facile d'ouvrir que de fermer, en raison de la présence de contraintes résiduelles, et aussi parce que l'extérieur est plus accessible que l'intérieur (fig. III-71 et III-72).

*Cintrage conique.* — Avec des rouleaux cylindriques, le cintrage des viroles tronconiques exige un glissement continuel pour maintenir les génératrices dans l'axe du rouleau-cintreur.

On obtient ce glissement en butant le profil intérieur de la tôle (petite base) sur le palier ou sur une cale, en cornière généralement (fig. III-73). Certaines machines sont équipées d'un rouleau de butée (fig. III-74).

La position de la tôle par rapport au rouleau est corrigée constamment pendant l'avance, par la butée qui s'oppose au déplacement

parallèle et force la tôle à glisser sous les rouleaux. Ce glissement est facilité par le graissage du point de contact sur la cornière.

Il existe aussi des machines à rouleaux coniques, mais leur utilisation est limitée généralement aux travaux de série et aux pièces minces de petites dimensions.

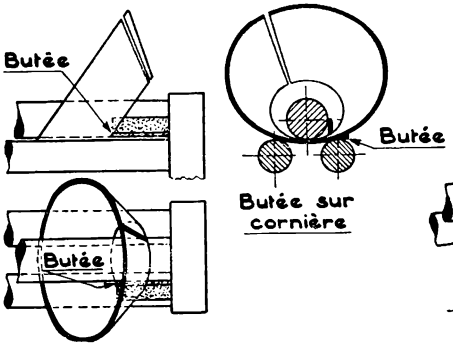



Fig. III-73.

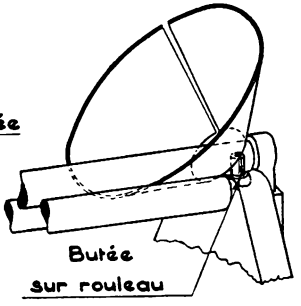



Fig. III-74.

Les *tôles polies* sont cintrées sur des machines à rouleaux polis. A défaut, on cintre entre deux feuilles de métal poli ou deux feuilles de papier fort.

Les *tôles très épaisses* sont cintrées par portions dans des formes usinées au rayon de cintrage, à froid ou à chaud, sur des presses hydrauliques très puissantes. Les formes sont verticales, ce qui facilite la manœuvre des tôles.

***Cintrage sur plieuse*** (voir fig. III-104 à III-106).

***Cintrage sur presse-plieuse.*** — *Avec des outils classiques de pliage*, par plis successifs (fig. III-69) ; il est indispensable de tracer des génératrices — de la surface cylindrique (ou conique) — régulièrement espacées et de bien placer l'arête du poinçon sur ces génératrices (fig. III-74 *bis*).

*Avec des outils au rayon* (fig. III-75 et III-76) le cintrage est plus rapide et plus régulier ; toutefois, on ne peut pas faire une virole

complète : on exécute deux demi-viroles (fig. III-75). Les cylindres de petits et moyens diamètres peuvent être fermés presque complètement, avec des poinçons longs et dégagés (fig. III-76).

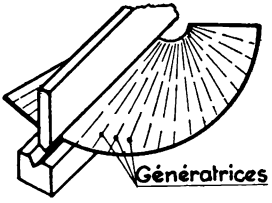



Fig. III-74 *bis*.

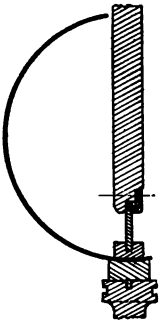


Fig. III-75.

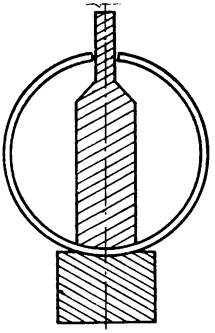


Fig. III-76.

*Avec des outillages spéciaux* (fig. III-77) il faut deux outillages : un pour l'amorçage des extrémités : (I et II), et pour le cintrage de milieu : (III), et un autre pour la fermeture : (IV). On cintre ainsi les gros tubes d'acier utilisés pour le transport des liquides et des gaz (pipe-lines). Longueur : 12 m, ∅ : 500 à 700 mm.

***Bordage sur presse-plieuse.*** — Les bordés droits sont roulés très facilement et très rapidement, même en grandes longueurs, sur

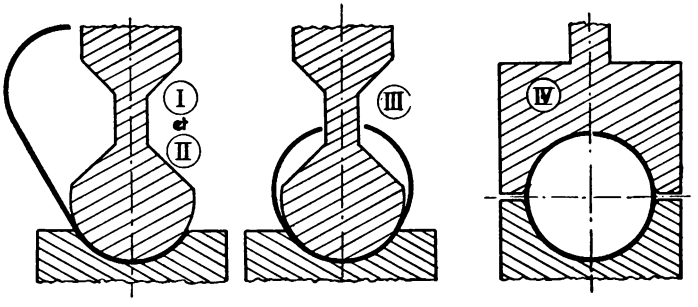



Fig. III-77. — Cintrage sur presse-plieuse.

des outils classiques de cintrage : sur la figure III-78, le bordé est roulé en trois opérations, avec deux outils (I, II et III) ; si l'axe du bordé doit être situé dans l'axe de la tôle, on donne un quatrième

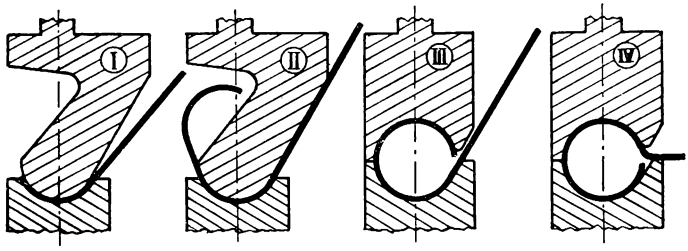



Fig. III-78. — Bordage sur presse-plieuse.

coup de presse (IV), après retournement de la tôle. A l'aide d'outils spéciaux, le bordé peut être roulé et fermé en deux opérations (fig. III-79).

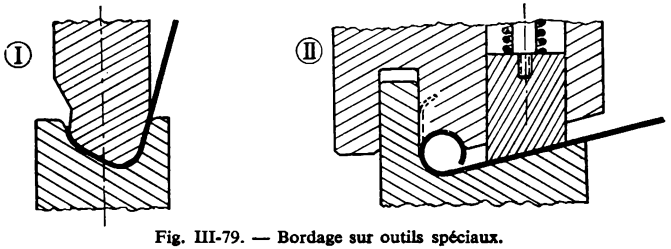



Fig. III-79. — Bordage sur outils spéciaux.

## LE PLIAGE

Le pliage est en principe un cintrage suivant un faible rayon. Le rayon intérieur de pliage $r$ varie avec la nature et l'état du métal.

| | Acier doux | Cuivre-aluminium | Inoxydable | Duralumin normal |
|---|---|---|---|---|
| Recuit. | $r = 2e$ | $r = e$ | $r = e$ | $r = 3$ à $4e$ |
| Écroui. | $r = 2$ à $3e$ | $r = 2e$ | $r = 2$ à $5e$ | |

*On ne plie jamais à angle vif* (amorces de cassures).

**Développé d'une tôle pliée.** — La longueur développée peut varier avec le rayon de pliage, l'épaisseur de la tôle, la méthode utilisée, etc. Dans le pliage à la main, ou à la plieuse, on admet que la longueur développée est égale à la longueur de la fibre moyenne, comme pour le cintrage (fig. III-50 et III-80).

Lorsqu'il s'agit de pliages de précision, à faible rayon de pliage, surtout à la presse-plieuse, le développé est mesuré sur la fibre neutre située de 0,4*e* à 0,25*e*, de la face intérieure du pli (fig. III-81).

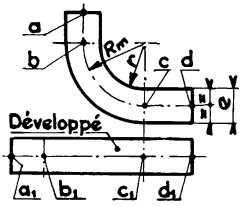



Fig. III-80.

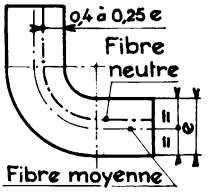



Fig. III-81.

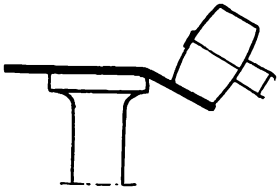


Fig. III-82.

**Pliage à la main.** — ***Outillage.*** — La méthode la plus simple est celle qui consiste à plier à la main ou au maillet sur l'arête d'un tas ou d'une tranche à border (fig. III-82). Cette méthode n'est applicable qu'aux petites longueurs et aux épaisseurs faibles et moyennes. Les tôles épaisses peuvent être pliées sur l'arête arrondie d'un tas au maillet, à chaud.

Dans un étau, on obtient, plus facilement, un travail meilleur. On évite l'angle vif que marquerait l'arête des mors de l'étau en interposant à l'intérieur du pli, une mordache en tôle dont l'épaisseur augmente avec le rayon désiré (fig. III-83).

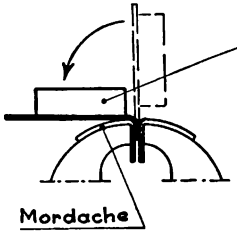



Fig. III-83. — Pliage sur mordache.

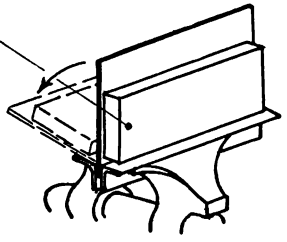


Fig. III-84. — Pliage entre 2 cornières.

Lorsque la longueur de la tôle est supérieure à la largeur des mors, on plie entre 2 cornières dont l'angle a été arrondi (fig. III-84). Mais ce montage ne peut convenir que si la longueur de la tôle ne dépasse pas 2 à 3 fois la longueur des mors de l'étau.

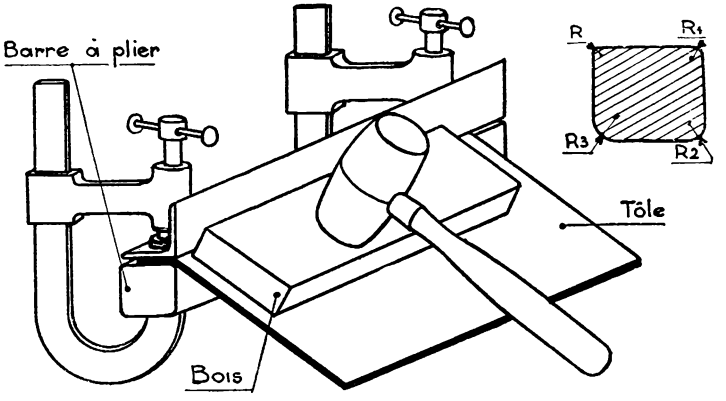



Fig. III-85. — Pliage sur barre.

Pour les grandes longueurs, on utilise les barres à plier. La tôle est serrée par des boulons, des presses ou des cames entre 2 fers carrés ou cornières (fig. III-85). Les arêtes de la barre sont arrondies à des rayons différents.

***Méthode de pliage.*** — Pour plier sans déformer le bord, il est indispensable de faire un travail comparable à celui d'une plieuse, qui agit sur toute la longueur de la tôle et maintient le bord droit durant tout le pliage.

Si le pliage est conduit sans précautions, chaque coup de maillet ou de marteau fait une ondulation qui allonge le bord (fig. III-86).

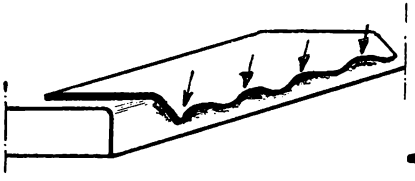


Fig. III-86. — Bord ondulé au pliage.

Fig. III-87. — Bord cintré par allongement.

Ces déformations et allongements successifs, qui paraissent avoir disparu lorsque le bord est complètement rabattu, se manifestent après desserrage du montage, par le cintrage du bord dans le sens indiqué par la figure III-87.

Pour éviter ce défaut, on rabat le bord aussi uniformément que possible par pliage dans son ensemble, sinon par toutes petites passes faites régulièrement.

Dans l'étau ou sur barre, on rabat le pli sur toute sa longueur par pression à la main (fig. III-83, tôles minces), ou en frappant sur une pièce de bois avec un gros maillet (fig. III-85). Malgré ces précautions, le bord est presque toujours légèrement cintré. On peut remédier à ce défaut en serrant, de préférence, le petit bord dans l'étau ou dans le montage.

## Pliage à la machine.

Dans toutes les machines à plier, deux bâtis ou montants supportent les organes essentiels :

La *table T* (fig. III-88), solidement liée aux montants.

Le *sommier de serrage S*, qui par sa pression immobilise la tôle sur la table pendant le pliage. Guidé par deux glissières dans les montants, son mouvement vertical est commandé soit manuellement par volant et vis (petits modèles) soit mécaniquement, par un ensemble moteur-réducteur qui agit sur des vis, soit par des vérins à huile.

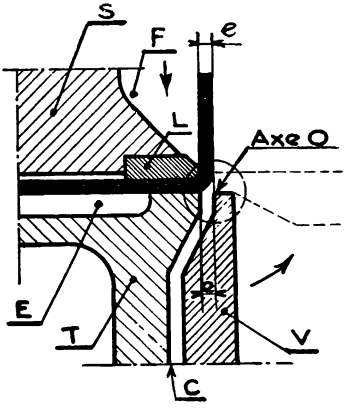



Fig. III-88. — Schéma d'une plieuse.

Le *volet de pliage V* articulé autour d'un axe horizontal *O*, exécute le pli en une seule fois, sur toute sa longueur.

Sur le sommier et sur le volet, on peut monter rapidement des lames de formes très variées et tous les organes de la machine sont étudiés pour l'exécution de plis rapprochés (fig. III-96, 101 et 102). La longueur utile de pliage — couramment 2 m — peut atteindre 5 à 6 m pour des tôles de 10 mm d'épaisseur et plus.

### *Différents types de plieuses :*

1° *Plieuses simples.* — L'axe de rotation *O* est confondu avec l'arête intérieure du volet de pliage (fig. III-88 à III-91) qui, de ce fait, tourne sur elle-même pendant le pliage.

L'axe *O* est *mobile horizontalement* seulement, ce qui permet de faire varier l'écartement (*e* à $E_1$) qui doit être *au moins égal* à l'épaisseur de la tôle à plier (fig. III-88). En augmentant cet écartement sans changer la lame de pliage, on fait varier le rayon de pliage : avec *e*, le rayon est *r* (fig. III-89), tandis qu'avec *E*, le rayon devient *R* (fig. III-90). Trop d'écartement, $E_1$, risque de donner un pliage irrégulier (fig. III-91).

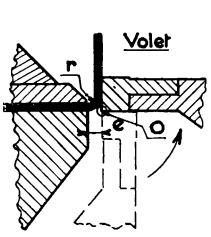


Fig. III-89.

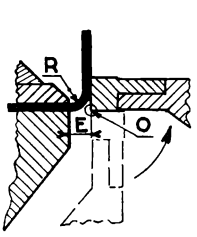


Fig. III-90.

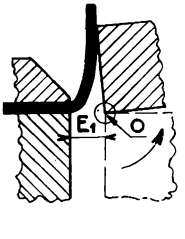


Fig. III-91.

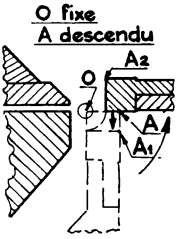


Fig. III-92.

2° *Plieuses universelles.* — Le volet de pliage peut être décalé (*D*) par rapport à *O* (fig. III-93) puis la table et le volet sont remis dans le même plan de deux façons différentes :

*a)* La table reste fixe et l'ensemble, axe de rotation-volet, est remonté (*O* devient $O_1$) pour remettre le volet à hauteur de la table (fig. III-94).

*b)* L'axe de rotation avec son volet restent à la même hauteur et c'est la table qui est descendue au niveau du volet (fig. III-95), *B* descendu en $B_1$.

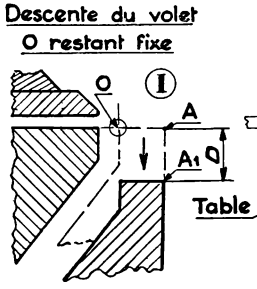


Fig. III-93.

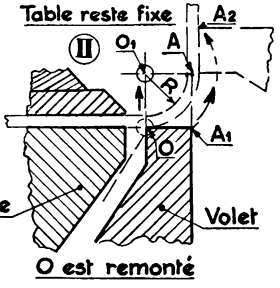


Fig. III-94.

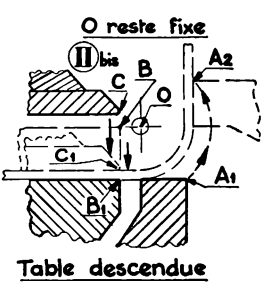


Fig. III-95.

Dans les deux cas, l'arête du volet de pliage décrit un cylindre, de rayon égal au décalage *D*, de la lame du volet. Cette disposition augmente les possibilités des plieuses pour l'exécution de pliages spéciaux et de cintrages (voir plus loin).

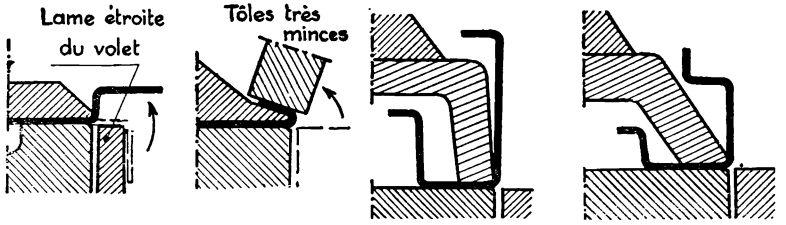



Fig. III-96. — Lames diverses.

Dans certaines machines, on peut *écarter le volet* de la table à une extrémité seulement (voir fig. III-106) et parfois le *sommier de serrage* est *articulé* à une extrémité pour le dégagement de corps fermés (boîtes, prismes, etc.).

Souvent les tourillons sont creux en *O* pour le passage de barres rondes en vue de l'envirolage de petits tubes.

Le pliage des tôles moyennes et épaisses exige de très gros efforts et des machines robustes. Au-dessus de 2 à 3 mm, la commande est sérieusement démultipliée, si elle est manuelle ; plus couramment elle est mécanique.

***Méthode de pliage.*** — *Trait de guidage.* — Sur la tôle développée on trace, à partir du point $b_1$, un trait à une distance égale au rayon intérieur *r*.

Ce trait sera placé dans le plan vertical tangent à la lame. Pour les tôles minces pliées au rayon normal, ce trait est pratiquement confondu avec le milieu de l'arc $\overset{\frown}{bc}$. Dans l'exemple de la figure III-97, pour $e = 1$ et $r = 2$, $\overset{\frown}{bc} = 3{,}9$ soit pratiquement : 4.

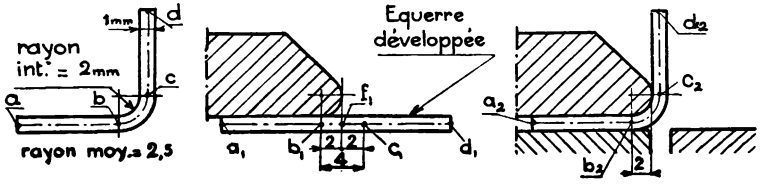



Fig. III-97.

Mais pour les grands rayons il peut y avoir des différences sensibles (fig. III-98).

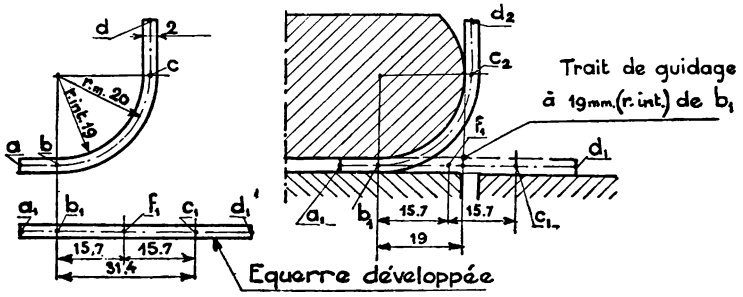



Fig. III-98. — Position du trait de guidage.

*Butées.* — Chaque fois que c'est possible, on plie sur butées (suppression du traçage) qui sont, soit encastrées dans la table pour les petits bords (fig. III-100), soit fixées en arrière et même en dehors de la table (fig. III-99).

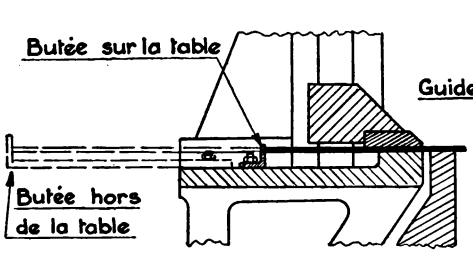



Fig. III-99. — Butées de pliage.

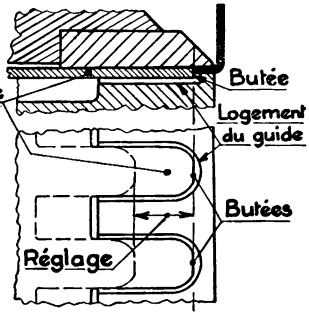



Fig. III-100.

Les butées arrière sont aussi indispensables lorsque l'on doit plier sur mandrin (fig. III-102) ou sur cale (fig. III-103). Dans ce cas, on est obligé de serrer le sommier en porte-à-faux (lorsque le pliage est plus court que les lames), et d'autant plus énergiquement que la cale tend à glisser vers l'arrière, sous l'action du volet de pliage : une butée arrière évite tout glissement, même avec un serrage très modéré du sommier.

Des *butées angulaires* réglables limitent la course du volet de pliage, permettant ainsi de faire rapidement des séries de pliages, au même angle, sans tâtonnements.

Lorsque l'un des bords est étroit on le serre sous le sommier, le volet agissant sur le bord le plus large (fig. III-101 et III-102).

La figure III-101 indique les phases d'exécution d'un oméga, et la figure III-102 montre la fabrication d'un corps creux à section rectangulaire en utilisant en III une lame coudée, et en IV, un mandrin avec butée pour éviter le glissement.

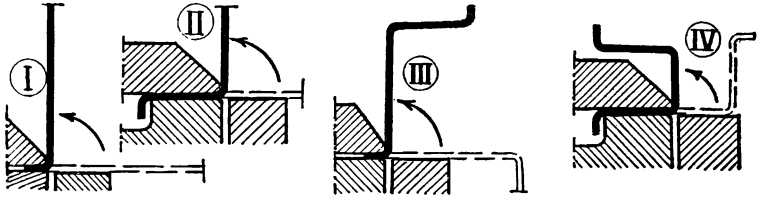



Fig. III-101. — Pliage d'un oméga.

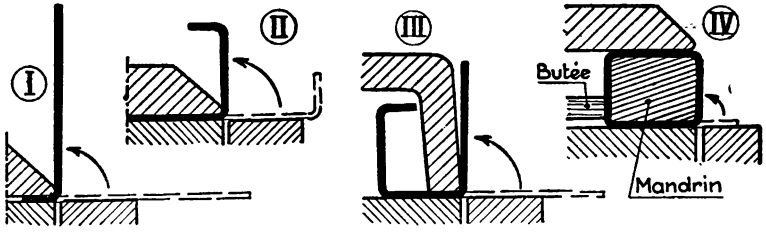



Fig. III-102. — Pliage d'un tube de section rectangulaire.

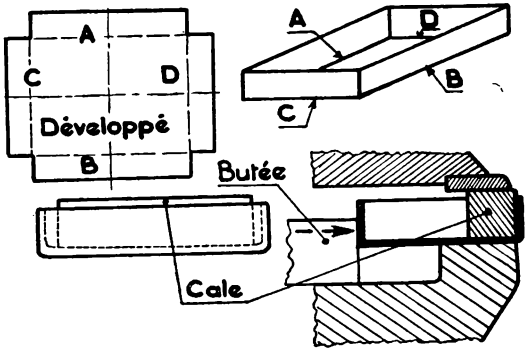



Fig. III-103. — Pliage des côtés d'une boîte.

Lorsqu'on plie sur cales, elles sont « pentées » de 5 à 10° (voir fig. III-186) pour compenser l'ouverture du pli par élasticité.

La fabrication de boîtes rectangulaires ou carrées exige l'emploi de cales intérieures. En partant du développement de la figure III-103, on fait en premier lieu les 2 plis *A* et *B* suivant la plus grande dimension. Un calage de la longueur des petits côtés et d'une hauteur supérieure à la profondeur de la boîte est nécessaire pour le pliage des côtés *C* et *D*.

***Cintrage cylindrique sur plieuse.*** — Par une *succession de plis*, on peut exécuter des formes cylindriques avec les lames courantes de pliage, en procédant comme figure III-104. Les plis restent marqués

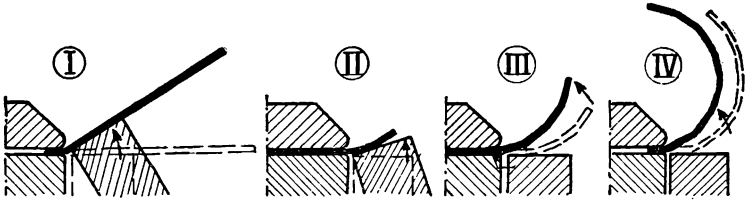



Fig. III-104. — Cintrage cylindrique sur plieuse.

et d'autant plus qu'ils sont plus espacés et, si on veut une surface plus nette, on cintre plus fermé, pour ouvrir ensuite, au maillet à coup portant. A noter que l'on ne peut pas obtenir une virole complète.

*Cintrage sur mandrin.* — Sur un mandrin, on obtient un travail beaucoup plus rapide, plus propre et on peut faire des viroles complètes, mais il faut des lames spéciales (fig. III-105) et des tourillons creux pour le passage des mandrins ou, à défaut, des butées arrière afin d'éviter le glissement (voir fig. V-17).

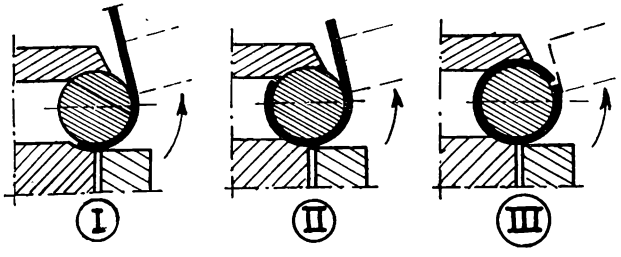



Fig. III-105. — Fabrication d'un tube sur barre.

*Cintrage conique par plis successifs.* — Pour les formes coniques, il est particulièrement important de disposer la tôle de telle sorte qu'à chaque déplacement, l'arête de la lame de pliage soit bien située sur une génératrice (fig. III-106). Si la machine le permet, en écartant le volet en *E*, du côté de la base du cône, on obtient un rayon de pliage variable : petit rayon vers le sommet et grand rayon vers la base. A chaque avance de la tôle, le sommet *S* — si c'est un cône — n'est pas déplacé. Comme il est impossible de revenir en arrière, on tient le cône plus fermé et on ouvre au rayon voulu — au maillet à coup portant — en faisant disparaître les plis ; souvent, on laisse les plis apparents.

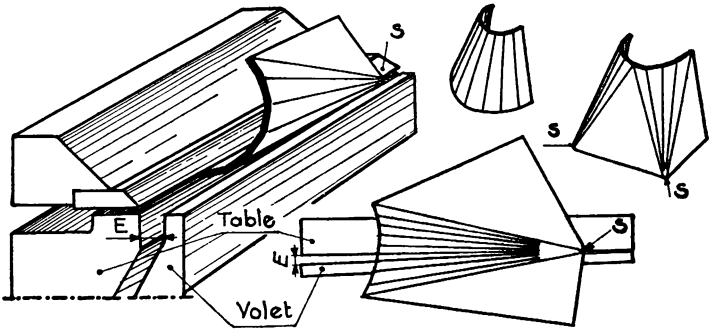



Fig. III-106. — Cintrage conique sur plieuse.

## PLIAGE A LA PRESSE-PLIEUSE

**Principe.** — Pliage entre une matrice de forme (généralement fixe) et un poinçon (de forme correspondante), mobile dans un plan vertical, montés sur une *presse-plieuse*, qui peut être *mécanique*, ou commandée à l'*huile sous pression (presse dite hydraulique)*.

**Presses-plieuses.** — Toutes les presses ont des organes communs : le bâti formé de deux montants, très solidement réunis par mécano-soudure, la poutre porte-matrice et le coulisseau, en acier laminé de très forte section (fig. III-107).

La *commande mécanique* comprend : un moteur électrique, entraînant un lourd volant, les organes réducteurs, un embrayage électro-

pneumatique (voir p. 192), un arbre vilebrequin (ou à excentriques) avec deux bielles qui agissent sur le coulisseau (fig. III-107).

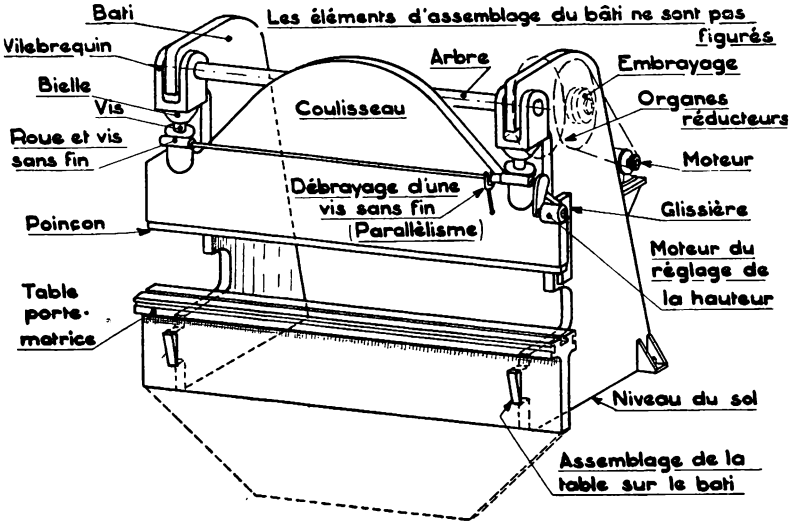



Fig. III-107. — Schéma d'une presse-plieuse.

Si la *commande* est *hydraulique*, les bielles sont remplacées par des vérins à huile, qui sont généralement synchronisés, comme dans les cisailles guillotines (voir p. 53) pour les opérations où la résultante de l'effort n'est pas au milieu du coulisseau. Les presses qui ne possèdent pas ce dispositif d'équilibrage, sont équipées de sécurités qui stoppent la machine, lorsque le non-parallélisme des outils atteint une valeur dangereuse.

Les tables et le coulisseau ont couramment de 2 à 6 m de longueur et ils peuvent atteindre 12 m dans les très gros modèles.

Toutes les machines sont équipées d'un réglage du parallélisme des outils, et pour les presses mécaniques d'un réglage de l'écartement des outils.

Malgré leur rusticité, et leur cadence plus rapide, les presses mécaniques sont fortement concurrencées par les presses hydrauliques, appréciées pour leur souplesse de marche et de réglage (voir p. 196) : après une descente rapide, le coulisseau s'arrête au contact de la tôle puis il repart doucement, ce qui évite, pour les grandes tôles, le « coup de fouet » — avec ses risques d'accident — et les déformations (contre-plis), par inertie de la tôle.

Les ***outils de pliage,*** appelés *lames de pliage,* ou *poinçons* et *matrices,* sont en acier traité et de formes très diverses.

Le croquis III-108 donne quelques exemples de montages et de formes de poinçons : droits, minces et déportés. Les matrices se

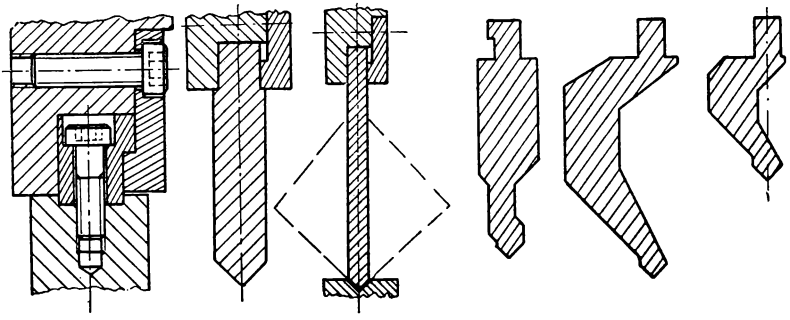


Fig. III-108. — Montage et formes diverses de poinçons de pliage.

montent sur la table de différentes façons (fig. III-109-110) et à côté des matrices classiques en V, simples ou multiples (fig. III-109) ; on utilise des matrices étroites ou dégagées pour pliages rapprochés (fig. III-110).

Largeur des V : 8 fois l'épaisseur de la tôle, 10 à 12 fois pour tôles épaisses, et 5 à 4 fois (minimum) pour les travaux de précision.

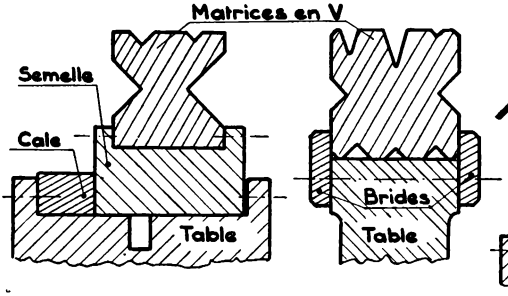



Fig. III-109. — Montage de matrices de pliage.

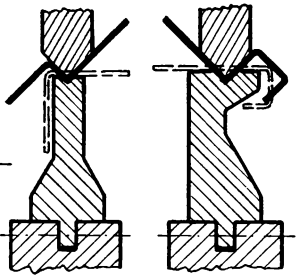


Fig. III-110.

**Méthodes de pliage.** — ***Pliage « en l'air ».*** — Le poinçon ne va pas à fond de matrice, ce qui permet, avec les mêmes outils, de faire des pliages à angles différents (fig. III-112). Inconvénients : le

rayon intérieur n'est pas garanti (fig. III-111), la valeur de l'angle peut varier avec les irrégularités d'épaisseur, le pli s'ouvre par élasticité (ce qui exige des outils plus fermés que l'angle à obtenir) et la carre du pli n'est pas toujours bien droite.

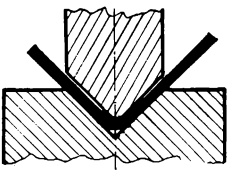


Fig. III-111.

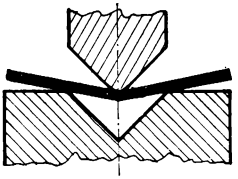


Fig. III-112.

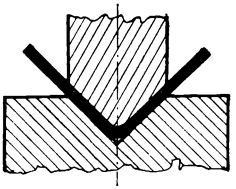


Fig. III-113.

***Pliage en frappe.*** — Pour tôles jusqu'à 1,5 mm. Le poinçon agit sur toute sa surface et lamine la tôle (fig. III-113). L'angle et l'arrondi sont ceux du poinçon et la carre est droite mais il faut des efforts plus élevés qu'en pliage en l'air (3 à 5 fois plus).

***Calcul du développé.*** — Lorsque le rayon intérieur de pliage $r$ est plus grand que $5e$, on calcule la longueur développée de la fibre moyenne (voir fig. III-80). Si $r$ est plus petit que $5e$, on situe la fibre neutre à $\approx 0{,}4e$ pour le travail « en l'air », et à $\approx 0{,}25e$, pour le travail en frappe (voir fig. III-81).

Les spécialistes utilisent des tableaux établis empiriquement; de toute façon, il est prudent de faire quelques essais avant de lancer une série.

***Butées.*** — A la presse-plieuse, il est rare de plier au tracé : on plie en butée, ce qui exige un cisaillage précis.

Il existe une grande diversité de butées dont quelques exemples sont donnés par les figures III-114 et III-115. Pour les travaux de

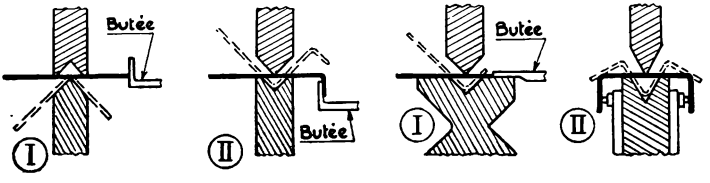



Fig. III-114.

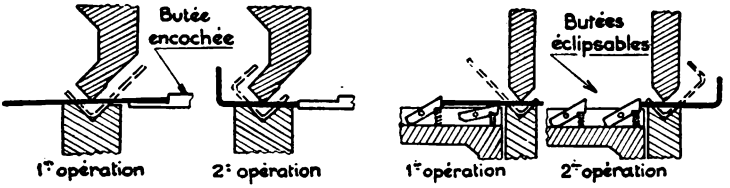



Fig. III-115.

série, on utilise des butées montées sur tourelle-révolver (modèle Colly, fig. III-116). Les deux tourelles portant de 8 à 12 butées réglables et éclipsables, sont commandées à l'air comprimé. A chaque coup de presse, elles tournent d'une division, et présentent la butée en position pour le pli suivant. Pour pliages multiples en série.

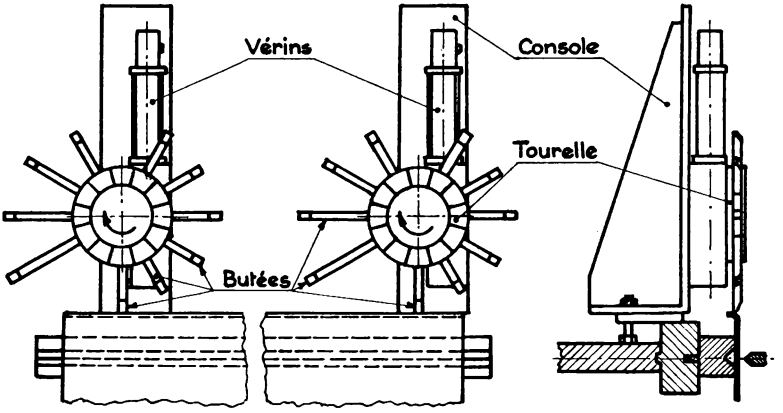



Fig. III-116. — Butées multiples sur tourelle (modèle Colly).

***Pliages simples.*** — Sur les croquis III-117 à III-119, sont schématisées les différentes phases de la fabrication de bords raidisseurs

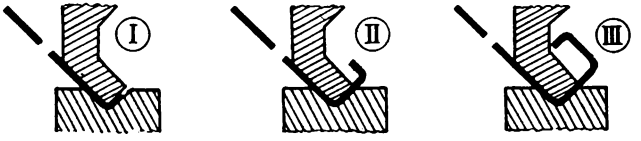



Fig. III-117. — Pliage d'un bord raidisseur.

et de profilés pliés, exécutés pli par pli. De même, par une série de pliages simples, on peut obtenir un profil fermé, terminé à l'aide d'outils plats sur un mandrin (fig. III-120).

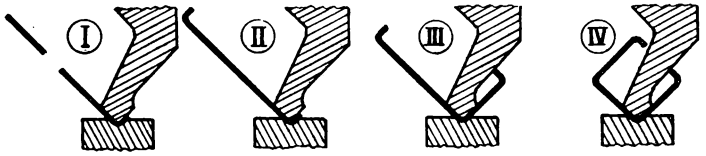



Fig. III-118. — Pliage d'un profilé en U.

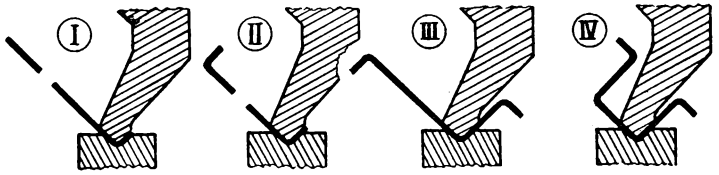



Fig. III-119. — Pliage d'un oméga.

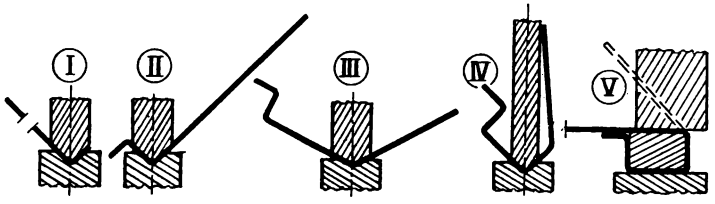



Fig. III-120. — Pliage d'un bord raidisseur fermé.

Les profilés pliés sont très utilisés comme raidisseurs de containers de réservoirs etc. (voir fig. VI-32).

***Pliages multiples.*** — Avec des outils spéciaux, on peut, d'un coup de presse, faire plusieurs plis dans une même pièce. Sur la figure III-123 on voit la fabrication de la même pièce que figure III-120, en deux coups de presse, au lieu de cinq. Les outils des figures III-121 et III-122

permettent de faire, en une seule fois, de nombreux plis ; remarquer les butées de réaction qui neutralisent les efforts horizontaux sur le coulisseau.

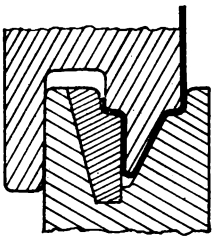


Fig. III-121.

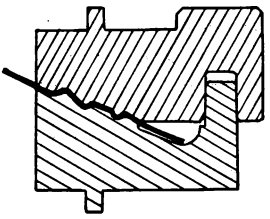


Fig. III-122.

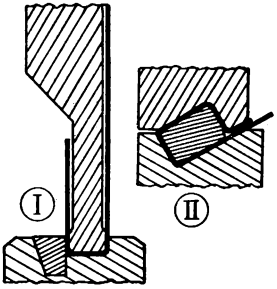



Fig. III-123.

***Outils en ligne*** (fig. III-124). — Pour pliages de faible longueur ; chaque outil est alimenté par un ouvrier et la pièce est passée de main en main de telle sorte, que chaque coup de presse livre une pièce terminée : amélioration du coefficient d'utilisation de la machine, manutentions et stockage intermédiaires supprimés.

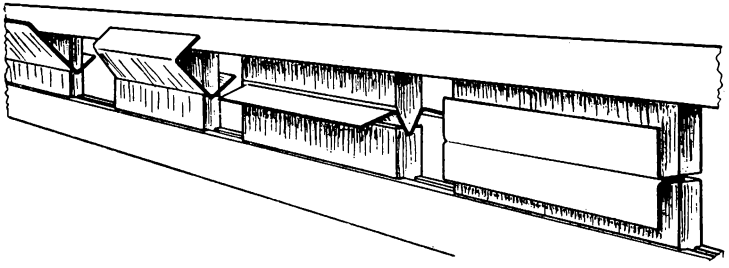


Fig. III-124. — Pliage sur outils en ligne.

Sur ces presses, on peut faire du *cintrage* (voir fig. III-74 *bis* à III-77), du *bordage* (voir fig. III-78 et III-79) et de l'*agrafage* (voir fig. IV-28).

Malgré leur prix élevé, ces machines ont de gros avantages : cadences de fabrication élevées, produits parfaitement rectilignes, profils calibrés avec précision.

Toutefois, pour les très grandes séries, les *machines à galets* en ligne (analogues à celles de la figure VII-3), à *déformation progressive*, qui livrent des profils parfaits, en continu, à partir de bandes, sont d'un rendement supérieur.

Il faut signaler que sur les presses plieuses, on peut monter sur des fausses tables (fig. II-47) des outils de poinçonnage, des outils de découpage, des unités de poinçonnage ou d'encochage en ligne, etc.

**Pliage sur coussin en élastomère et sur presse-plieuse.** — On remplace la matrice par un coussin en élastomère (matière plastique ayant des propriétés analogues, mais supérieures à celles du caoutchouc : résistance élevée au déchirement et à l'abrasion, résilience élevée, etc.).

Le coussin est logé dans un container solide, fermé aux deux extrémités. Dans la matrice, on doit prévoir un vide dont le volume est égal à celui que déplace le poinçon (fig. III-125).

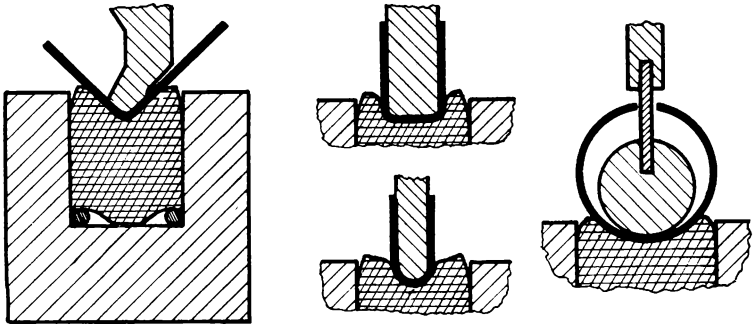


Fig. III-125. — Pliage sur élastomère.

Une applique d'usure, non figurée sur le croquis, en élastomère de faible épaisseur (1 à 3 mm), peu coûteuse, et remplacée facilement, protège le coussin sur sa face de travail.

Le même coussin peut servir pour différents poinçons et les croquis de la figure III-125 sont des schémas d'outils simples. On peut concevoir des outillages, variés et complexes, en utilisant des barres et des coins de réaction (voir fig. III-126 *bis*).

**Cambrage** (1) **sur élastomère et sur presse.** — Même principe que sur presse-plieuse, mais avec les outillages inversés

(1) Ce terme est surtout utilisé pour désigner les opérations de pliage et de cintrage exécutées sous une presse.

(fig. III-126 et III-126 *bis*). L'élastomère est logé juste en longueur et en largeur dans un container très résistant, fixé sous le plateau supérieur. Les formes — ou poinçons — sont souvent simplement posés

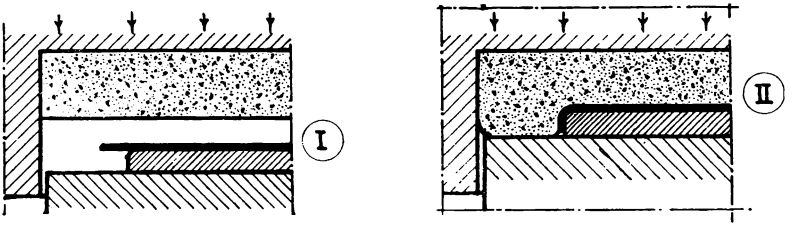



**Fig. III-126. — Cambrage au caoutchouc.**

sur le plateau inférieur, et l'élastomère remplace la matrice. Pour augmenter l'effort dans le sens horizontal, on utilise des coins de réaction ou des déflecteurs (fig. III-126 *bis*).

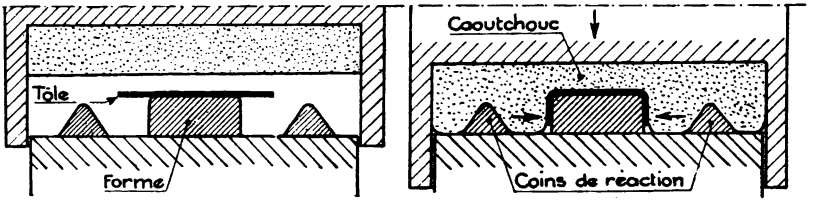



**Fig. III-126 *bis*. — Cambrage d'un profilé.**

# MISE EN FORME DES SURFACES NON DÉVELOPPABLES A LA MAIN

## GÉNÉRALITÉS

Le formeur est l'ouvrier qui, par un martelage approprié peut donner, à une tôle, la forme de surfaces non développables. Ce travail appelé couramment « forme » peut être exécuté à partir d'une tôle plane ou à partir d'une surface formée développable : cylindre, tronc de cône, surface développable quelconque.

On opère par déformations plastiques en utilisant deux méthodes, seules ou combinées : l'*étirage* et la *rétreinte*.

**Étirage.** — L'étirage, qui prend les noms d'allongement, d'emboutissage ou d'ouverture suivant les cas, est une modification de forme des tôles, obtenue, en principe, par une augmentation de la surface accompagnée d'une diminution de l'épaisseur (fig. III-127 et III-128).

Chaque fois que l'on augmente la surface ou le diamètre et presque toujours les deux à la fois (fig. III-127), on procède par étirage.

Dans la figure III-128, $D_1 = D$ : augmentation de la surface sans modification du diamètre.

Dans les exemples de la figure III-127 $D_1 > D$ : augmentation du diamètre et de la surface.

L'épaisseur diminue, et dans tous les cas ; $e_1 < e$.

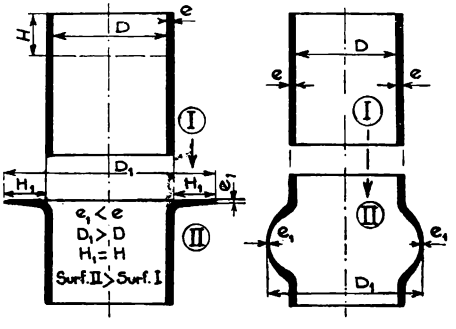



Fig. III-127.
Types de pièces étirées.

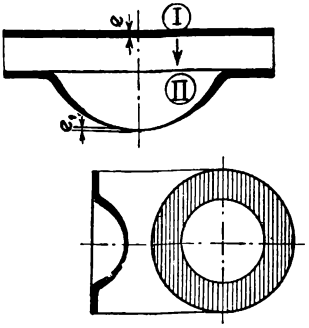



Fig. III-128.
Calotte emboutie.

**Rétreinte.** — On pourrait croire que la rétreinte est la déformation inverse de l'étirage : c'est-à-dire une modification de forme par diminution de la surface, accompagnée d'une augmentation de l'épaisseur. Mais pratiquement, les métaux en feuilles minces ne s'épaississent pas facilement, sauf dans des cas particuliers, et c'est l'art du formeur de conserver à la tôle une épaisseur uniforme.

Pour obtenir une modification de forme sans variation de l'épaisseur, il faut opérer *par déplacement de métal.*

Lorsque l'on diminue le diamètre et plus rarement la surface, on rétreint $D_1 < D$ (fig. III-129).

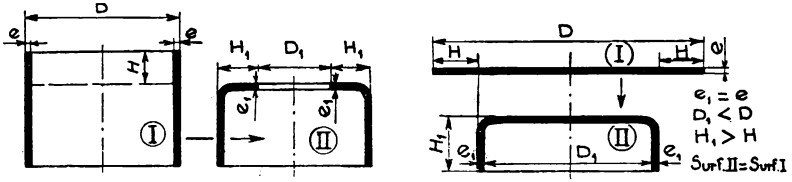



Fig. III-129. — Types de pièces rétreintes.

**Étirage et rétreinte combinés.** — *Calotte sphérique* (fig. III-130). — La partie centrale est emboutie, ce qui augmente sa surface en diminuant légèrement son épaisseur. Les bords sont rétreints sans modification de l'épaisseur et, par suite, de la surface. Pour amincir le moins possible, on réduit au minimum la surface emboutie.

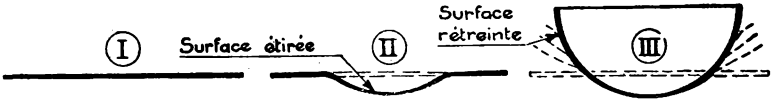



Fig. III-130. — Combinaison de rétreinte et d'étirage.

Dans l'exemple de la figure III-133, le bord est plié, étiré ou rétreint suivant la forme du profil.

Qu'il s'agisse d'étirage ou de rétreinte, on peut déterminer la nature et l'importance de la déformation en comparant $D$ à $D_1$. Nature de la déformation : si $D_1 > D$ : étirage, si $D_1 < D$ : rétreinte, si $D_1 = D$ : pliage. Le rapport $\frac{D}{D_1}$ permet de chiffrer l'importance de la *déformation qui augmente lorsque* $\frac{D}{D_1}$ *s'éloigne de* 1 et, autrement

dit, *lorsque le diamètre diminue et lorsque la hauteur du bord augmente.* Considérée seule, la hauteur du bord est une indication insuffisante ; ainsi pour une même hauteur de bord $h$, le taux de travail sera plus élevé dans la figure III-131 que dans la figure III-132, parce que le

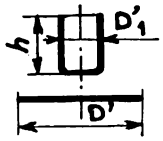



Fig. III-131.

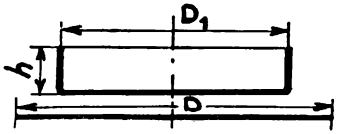



Fig. III-132.

rapport $\frac{D}{D_1}$ donne une fraction plus proche de 1 que le rapport $\frac{D'}{D'_1}$.

D'autre part, pour 2 pièces de mêmes dimensions, la difficulté augmente très rapidement quand l'épaisseur diminue.

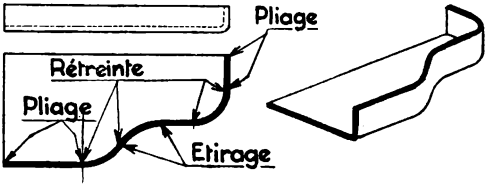



Fig. III-133.

**Ordre d'exécution des diverses opérations.** — ***Préparation des tôles.*** — Les bords cisaillés ou découpés sont ajustés avec soin pour faire disparaître toute trace de coups de cisaille ou d'outils. Une entaille insignifiante peut amorcer une cassure qui rend la pièce inutilisable.

***Traitements d'adoucissement des tôles travaillées à froid.*** — C'est presque toujours par un recuit que l'on donne au métal les qualités requises pour la mise en forme. Le duralumin est travaillé sur trempe fraîche, le plus souvent, et les aciers inoxydables austénitiques après une trempe d'adoucissement : 1 100 à 1 200 °C.

Tous les métaux et alliages utilisés en chaudronnerie peuvent être formés à chaud, sauf le laiton 67/33.

***Décapage.*** — Les tôles polies sont décapées après recuit, trempe ou travail à chaud, pour faire disparaître l'oxyde qui s'incrusterait dans le métal pendant le martelage. Après décapage, il est indispensable

de rincer parfaitement à l'eau courante et de sécher à la sciure de bois pour éviter l'oxydation des pièces et des outils qui doivent rester polis.

*Mise en forme.* — C'est un travail qui doit être conduit avec *beaucoup de régularité.* Il ne faut pas aller trop vite, mais au contraire opérer par petites passes nombreuses.

*Souplanage.* — Le souplanage a pour but de faire disparaître les déformations principales et les coups de marteau laissés par la mise en forme. C'est un planage grossier qui prépare le planage final. Pour cette raison, il est de plus en plus soigné, à mesure que l'on approche de la forme définitive.

De plus, c'est un martelage qui augmente la résistance mécanique du métal et qui ramène les tôles à l'épaisseur normale, dans le cas de rétreinte importante sur métal mou.

*Ajustage des bords.* — On enlève les irrégularités des bords dues à la rétreinte ou aux coups de marteau donnés trop près du bord. Toute crique doit être supprimée dès qu'elle se forme.

Ce cycle d'opérations est répété jusqu'à l'obtention de la forme recherchée, et complété par le planage.

## ÉTIRAGE OU EMBOUTISSAGE A LA MAIN (1)

On a vu au chapitre précédent, que l'étirage est en principe une déformation par augmentation de la surface et diminution de l'épaisseur.

Cette augmentation de surface est le plus souvent obtenue en totalité au détriment de l'épaisseur, mais quelquefois en partie par diminution de l'épaisseur et en partie par déplacement du métal. La bossette de la figure III-128 et la gorge de la figure III-134 sont formées à partir de tôles planes, uniquement par amincissement de la tôle. Les bords plats, hachurés sur le croquis ont une forme et une largeur qui s'opposent à la diminution du diamètre $D : D_1 = D$.

(1) Dans le travail à la main, on dit « emboutissage » lorsqu'il s'agit de déformations du milieu d'une tôle, et « étirage » pour le travail des bords.

La mise en forme à la presse dite « emboutissage » est obtenue très souvent par déplacement de métal (voir emboutissage à la presse).

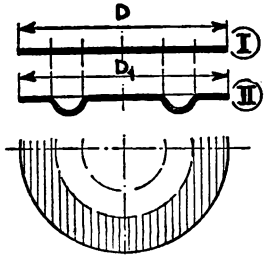



Fig. III-134. — $D_1 = D$.

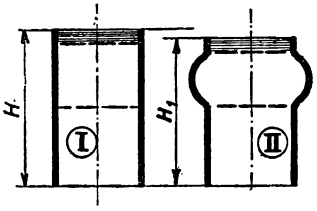



Fig. III-135. — $H_1 < H$.

Par contre, si on exécute une gorge dans un cylindre (fig. III-135) on observe une légère diminution de la hauteur : $H_1 < H$. Le bord hachuré n'oppose pas de résistance au déplacement du métal qui peut se faire sans modification de sa surface. Le glissement de ce bord a atténué la diminution de l'épaisseur dans la gorge.

## Différentes méthodes d'étirage et d'emboutissage à la main.

***Étirage à froid**, à coup portant sur tas acier.* — Lorsqu'il s'agit d'exécuter à partir d'une surface plane un embouti peu profond, on opère comme pour le dressage avec le même outillage et suivant la même méthode (fig. III-136). La déformation est obtenue en totalité par diminution d'épaisseur. Pour galber ou évaser légèrement une surface cylindrique ou conique, on utilise des pieds de chèvre, des chevalets, des olives ou des rognons montés sur chevalets ou sur barres carrées (voir fig. I-17 et III-137).

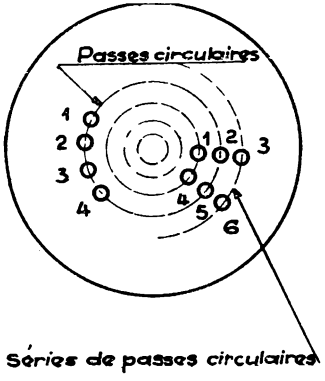



Fig. III-136. — Ordre d'exécution des passes ou séries de passes

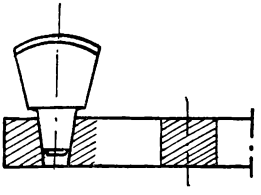


Fig. III-137. — Rognon sur barre carrée.

Le martelage est conduit par passes circulaires ou séries de passes circulaires (fig. III-136) avec des marteaux aussi plats que possible en allant du milieu vers le bord.

Les marteaux et les tas à dresser conviennent parfaitement pour ce travail qui ne s'applique qu'aux faibles déformations sur tôles minces.

Pour les déformations importantes surtout sur le bord de la tôle, on emploie le marteau à panne en travers, quelquefois en long (fig. III-138).

La déformation-type par cette méthode est le cintrage d'un feuillard sur champ qui est obtenu par allongement de la partie extérieure (fig. III-139).

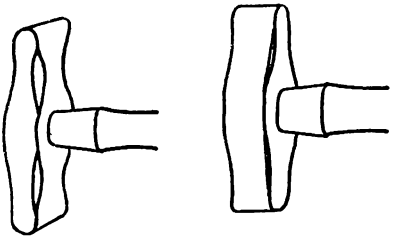


Fig. III-138. — Marteaux à panne en travers et en long.

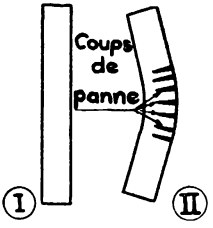



Fig. III-139. — Cintrage d'un feuillard.

La panne droite étire presque uniquement dans le sens perpendiculaire à son axe et les marteaux à gorge (fig. III-140) sont à prohiber pour ce travail.

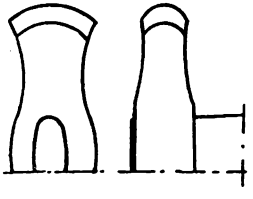


Fig. III-140.
Marteau à gorge.

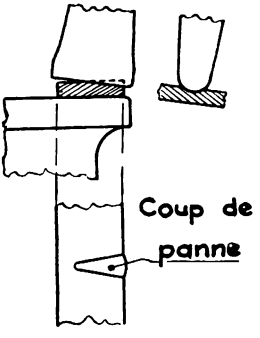



Fig. III-141.
Coup de panne correct.

Le cintrage de la bande exige un allongement nul à l'intérieur, croissant en s'approchant du bord, où il est maximum. C'est par inclinaison de la panne que l'on obtient ces variations de l'allongement (fig. III-141). L'empreinte laissée par le marteau est large et profonde à l'extérieur et à peine marquée à l'intérieur. On place la tôle sur le bord du tas, sinon on risque de marquer celui-ci avec l'arête de la panne.

On prépare le planage en utilisant vers la fin de l'étirage une panne de plus en plus large et on termine avec la table du marteau qui achève le cintrage.

L'application la plus courante de cette déformation est l'ouverture d'un collet dans un cylindre ou un cône, ou encore dans une tôle plane. On allonge de l'intérieur chaque fois que la forme le permet et on aide à l'ouverture du bord par une inclinaison de la pièce (entre le bord et le tas : de 1 à 3 mm) (fig. III-142). Le marteau allonge légèrement à défaut avant d'agir à coup portant. Si on incline trop la pièce, l'arête du tas, et l'allongement insuffisant, font « talonner » le collet (fig. III-143).

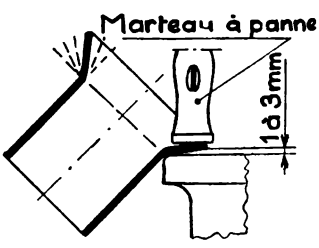



Fig. III-142. — Étirage d'un bord en collet.

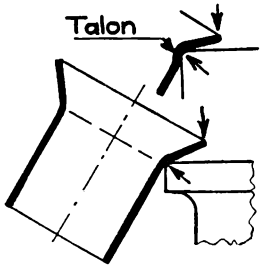



Fig. III-143. — Pièce trop inclinée.

Comme pour le cintrage d'un feuillard, on ouvre progressivement par petites passes très régulières (fig. III-144), puis on achève avec une large panne et un marteau à dresser.

Un étirage insuffisant donne la forme du croquis I (fig. III-145). Si au contraire on allonge trop, l'ensemble s'évase ou le bord se voile (II et III).

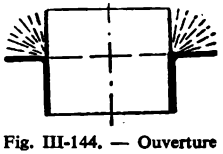


Fig. III-144. — Ouverture progressive du bord.

S'il n'est pas possible de frapper de l'intérieur on allonge de l'extérieur (fig. III-146), mais dès que l'ouverture est suffisante, on frappe de l'intérieur. Sur une tôle plane, l'exécution d'un collet est conduite comme figures III-152 et III-153.

*A défaut.* — L'étirage à défaut est généralement accompagné de rétreinte (voir chapitre rétreinte, fig. III-171 et III-172). Les

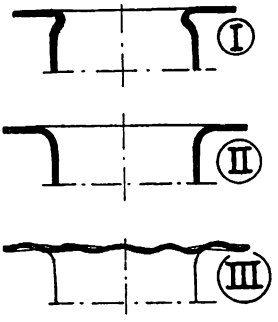



Fig. III-145. — I) Allongement insuffisant. — II) et III) Trop d'allongement.

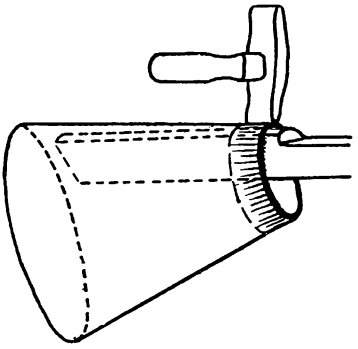


Fig. III-146. — Ouverture d'un bord par allongement de l'extérieur.

figures III-147 et III-188 donnent des exemples de déformations obtenues uniquement par emboutissage à défaut.

On utilise des maillets et des marteaux à emboutir et comme tas, des salières ou billots à emboutir (voir fig. III-147 et III-188).

On opère par passes concentriques de faible importance, en commençant par le milieu. Un travail trop rapide conduirait à la déchirure de la tôle surtout au centre où l'allongement est maximal.

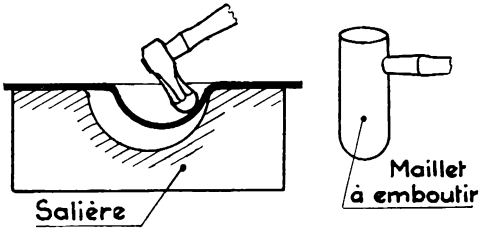



Fig. III-147. — Emboutissage à défaut ou à « faux ».

*A coup portant* SUR BILLOT EN BOIS, SUR TAS EN PLOMB OU SUR SAC DE SABLE. — Ces méthodes intermédiaires entre le travail à coup portant sur tas acier et le travail à défaut, sont les plus utilisées.

L'étirage à coup portant sur tas acier, peu rapide, ne s'applique qu'aux faibles déformations ; à faux, on déforme l'ensemble en amincissant fortement. A coup portant sur bois, sur plomb ou sur sable, le travail se rapproche de l'une ou de l'autre des méthodes précédentes avec leurs avantages et leurs inconvénients, suivant la dureté du support.

Les billots sont en bois dur debout, de nature variable avec le métal à travailler. Souvent cylindriques, avec le dessus plat (fig. III-151) ou légèrement creux, les billots peuvent avoir des formes variées adaptées aux surfaces embouties. Sur la figure III-148 est figuré un billot pour surfaces gauches.

Les tas en plomb sont coulés à la forme désirée : carrée, rectangulaire ou circulaire. Ils ne doivent pas être utilisés pour les alliages légers, pour lesquels, le sac de sable est tout indiqué. Un sac de toile très solide rempli de sable et cousu repose dans une auge en bois sur un support (fig. III-149) ; une basane protège efficacement le sac.

Sur bois et sur plomb on utilise le marteau à emboutir ; sur sac de sable, le maillet est préférable.

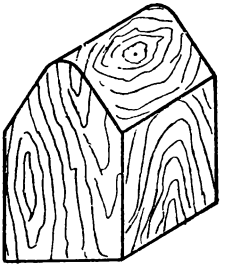


Fig. III-148. — Billot pour surfaces gauches.

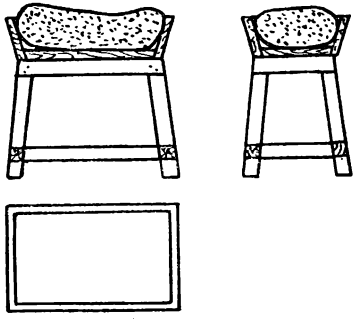


Fig. III-149. — Sac de sable.

L'action de l'outil n'affecte que la surface qu'il touche, emboutissant en même temps la tôle et le support (fig. III-150). Il convient de ne pas frapper toujours au même endroit sur le tas ; celui-ci se creuse, surtout sur le sac de sable, et on travaille alors à défaut. On déplace la pièce pour toujours frapper à coup portant.

On peut également évaser ou emboutir le milieu d'une surface conique ou cylindrique (fig. III-151). Il est prudent de ne travailler les bords de la tôle qu'à coup portant sur tas acier : on arrête les

passes d'étirage à 10 mm au moins du bord et on achève à la panne, puis à la table du marteau à coup portant sur tas acier de l'intérieur (fig. III-142) ou de l'extérieur (fig. III-146).

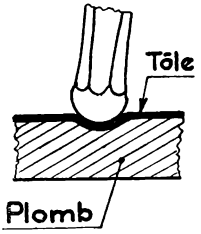



Fig. III-150.

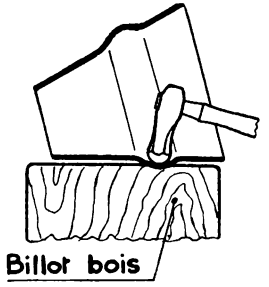



Fig. III-151. — Emboutissage du milieu d'une surface conique.

***Étirage d'un collet dans une tôle plane.*** — *1er cas. Le trou est découpé avant l'étirage* (fig. III-152). — Au marteau à boule, on fait une passe d'étirage au milieu du collet à coup portant sur bois ou sur plomb (II) en arrêtant l'étirage à environ 10 mm du bord; bien marquer la carre à la forme et à la cote. Le bord est ensuite étiré

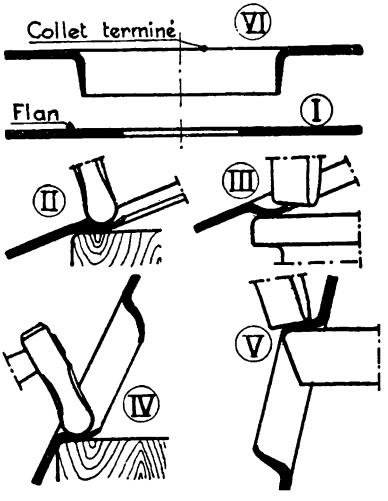



Fig. III-152. — Trou découpé à l'avance.

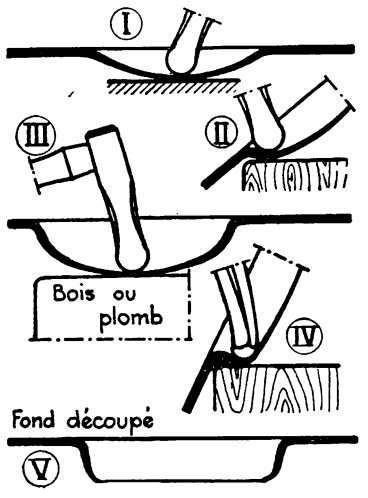



Fig. III-153. — Trou non découpé.

au marteau à panne à coup portant sur tas acier (III). On répète une ou plusieurs fois ces opérations (IV) en étirant le bord extrême de l'extérieur (V) lorsqu'on ne peut plus frapper de l'intérieur. Par un planage au postillon, on finit d'évaser de l'extérieur. Cette méthode est applicable à l'ouverture d'un collet large au bord d'une virole.

*2e cas. Le trou n'est pas découpé avant l'étirage* (fig. III-153). — On débute comme une calotte sphérique (I) en marquant nettement la carre à sa position exacte (II). C'est surtout le milieu qu'il faut emboutir (III) le collet étant formé progressivement en frappant doucement en (IV) pour éviter les cassures. On surveille les déchirures qui doivent se produire au milieu et on découpe le fond dès qu'elles s'approchent du collet. On termine comme précédemment.

Dans les 2 cas, il faut tenir la carre bien arrondie et le diamètre légèrement fort. Le planage final n'agit pas beaucoup au voisinage de la carre ; il évase surtout près du bord.

***Étirage ou emboutissage à chaud.*** — Dès que l'épaisseur atteint 2 à 3 mm pour les tôles d'acier, d'acier inoxydable et de cuivre, le travail devient pénible sinon impossible.

L'étirage à chaud se fait presque toujours à défaut, au maillet pour les tôles moyennes, au marteau pour les tôles épaisses. Le plus souvent, on utilise des salières ou emboutissoirs en fonte (voir fig. III-188) ou des tas en acier pour l'étirage des bords.

Les tôles épaisses sont formées généralement « en l'air », c'est-à-dire sans support.

Il y a avantage à ne chauffer, dans la tôle, que la surface que l'on veut travailler pour éviter les déformations de l'ensemble et les chalumeaux sont tout indiqués.

Pour emboutir une calotte, on opère comme à froid en travaillant par petites passes concentriques bien régulières et en commençant de préférence par le milieu.

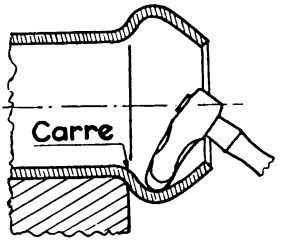



Fig. III-154.
Formage de la carre.

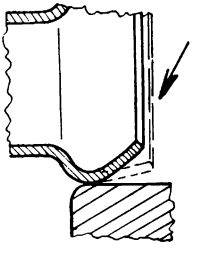


Fig. III-155.
Étirage du bord.

Lorsqu'il s'agit d'ouvrir un collet dans une tôle moyenne, on commence par marquer « la carre » tout le tour au marteau à emboutir ou au marteau à gorge, sur l'angle arrondi d'un tas (fig. III-154). Le cylindre ou le cône doit porter sur toute la longueur du tas. En frappant comme l'indique la figure III-143 on fait rentrer la carre.

Lorsque celle-ci est bien marquée (fig. III-154), on retourne la pièce que l'on appuie sur la surface précédemment formée (fig. III-155) et on étire le bord au marteau à emboutir, à panne large et au marteau à dresser pour terminer.

## LA RÉTREINTE A LA MAIN

***Principe.*** — La rétreinte est une opération de mise en forme par déplacement de métal, qui, bien conduite, ne doit pas modifier l'épaisseur.

La tôle tend à s'épaissir sur les bords. La surépaisseur, d'autant plus sensible que le métal est plus mou, est corrigée par le souplanage et le planage.

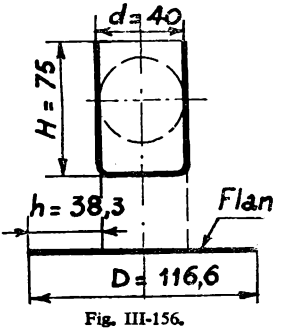


Fig. III-156.

Puisqu'en principe, l'épaisseur n'est pas modifiée, la surface reste la même à tous les stades de la mise en forme. On constate que pendant que le diamètre diminue pour passer de *D* à *d* (fig. III-156) la largeur du bord *h* augmente pour devenir *H*. Il se produit donc un déplacement ou glissement de métal vers le bord. Un exemple chiffré donne une idée plus précise de l'importance de ce déplacement de métal : pour exécuter une pièce rétreinte aux cotes du croquis III-156 il faut un flan de 116,6 de diamètre, ce qui donne à la couronne nécessaire pour former le bord une largeur de 38,3. Après rétreinte, cette largeur a presque doublé — 75 mm — mais le diamètre est passé de 116,6 à 40 mm.

La rétreinte d'un pli (fig. III-157) met bien en évidence le déplacement du métal. Après rétreinte, le pli a disparu et la tôle est plane. Le métal en excès, et qui formait le pli, s'est déplacé dans le sens perpendiculaire en donnant, sans surépaisseur, une pointe de métal

(fig. III-157). *L'épaisseur étant restée constante, la surface de la pièce ne varie pas ; elle est la même avant et après rétreinte.*

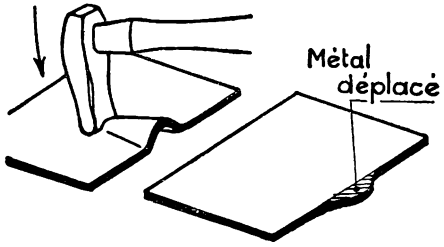



Fig. III-157. — Rétreinte d'un pli.

Le mécanisme du déplacement de métal dans la rétreinte est plus malaisé à saisir que celui de l'étirage. Pour essayer de l'expliquer, on peut faire une petite expérience, en mettant des billes très petites — ou des grains de sable — entre 2 bandes de tôle articulées et disposées en V (fig. III-158). Ces 2 bandes sont fixées sur une pièce de bois et

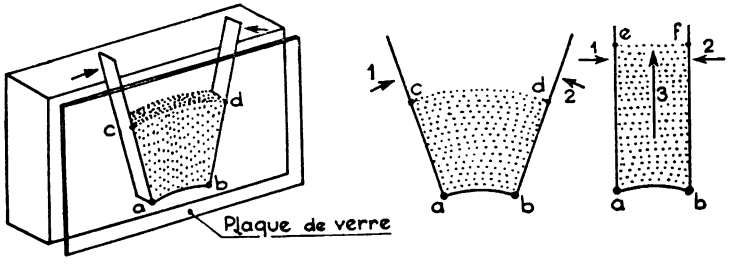



Fig. III-158.

après les avoir recouvertes d'une plaque de verre, on les remplit partiellement de sable. On rapproche alors les 2 bandes symétriquement pour les amener parallèles et on observe les mouvements des grains de sable (fig. III-158). Les grains qui se trouvent sur la base *ab* ne bougent pas ; tous les autres se déplacent vers le haut et leur déplacement est d'autant plus important qu'ils sont plus près de *cd*. Ceci montre que les déformations plastiques, nulles en *ab*, sont maximales en *cd* (l'épaisseur n'a pas pu varier entre la pièce bois et la

plaque de verre). C'est l'image — un peu grossière — du déplacement des cristaux pendant la rétreinte.

Si on considère maintenant une pièce avant et après rétreinte, on voit que la couronne du flan se transforme en un cylindre après mise en forme (fig. III-159), le fond n'étant pas déformé. En divisant la couronne d'une part, et le cylindre d'autre part, en un même nombre de parties égales, on remarque que chaque secteur de couronne se transforme en un rectangle : *abcd* devient *abef*. Ceci est mis en évidence par la superposition du flan et de la pièce terminée sur laquelle les divisions ont été coupées et les languettes rectangulaires rabattues dans le plan du fond (fig. III-160). L'action du marteau — ou des outils

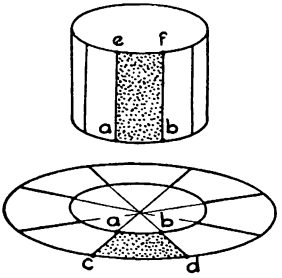



Fig. III-159.

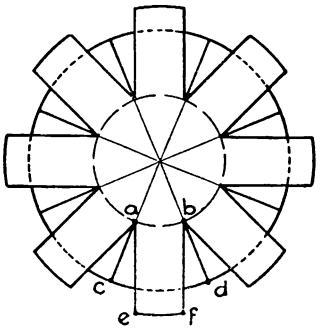



Fig. III-160.

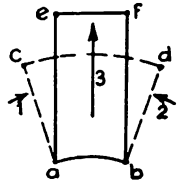



Fig. III-161.

dans le travail mécanique — tend à diminuer le diamètre, ce qui soumet le flan à un effort latéral de compression suivant la direction des flèches (1) et (2) (fig. III-161). Comme l'épaisseur ne varie pratiquement pas, le métal est obligé de se déplacer dans la direction générale de la flèche (3) comme le font les grains de sable dans l'expérience précédente.

**Calcul des surfaces équivalentes.** — Les tôles planes à partir desquelles on forme par rétreinte ou emboutissage, sont appelées « flans » ou surfaces équivalentes.

D'après ce que l'on vient de voir, la surface du flan est égale à celle de la pièce terminée. Cette égalité permet de calculer facilement les dimensions du flan.

Dans les surfaces de révolution, le *flan est un cercle.* C'est le cas le plus courant. Il s'agit de calculer le rayon du cercle désigné ici par $x$.

***Récipient cylindrique à fond plat*** de rayon $r$ et de hauteur $h$ (fig. III-162).

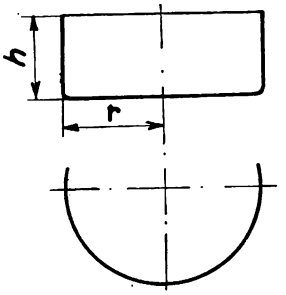



Fig. III-162.

On désigne par $x$ le rayon du flan :

surface du flan = surface du fond + surface du bord

surface d'un cercle de rayon $x$ = surface d'un cercle de rayon $r$ + surface latérale d'un cylindre de rayon $r$ et de hauteur $h$

ou : $\pi x^2 = \pi r^2 + 2\pi rh$

en divisant chaque terme par $\pi$ : $x^2 = r^2 + 2rh$

rayon du flan : $x = \sqrt{r^2 + 2rh}$ (1)

**Outillage.** — Le maillet en buis et le marteau à rétreindre sont les principaux outils utilisés en rétreinte. Les marteaux à rétreindre sont des marteaux à panne en travers à une seule tête. Épaisseur des pannes de 6 à 20 mm environ. Masse de 250 à 500 g.

Le profil correct de la panne est indiqué à la figure III-163. Une panne trop mince marque la tôle en l'amincissant inutilement. Pour le souplanage et le planage on emploie les marteaux postillons ou à dresser.

La forme des tas varie avec la forme de la pièce à rétreindre. Pour les formes cylindriques et coniques, le chevalet et le pied de chèvre sont les plus employés avec les bigornes diverses. Les tas à boule droits ou coudés et les olives servent de supports aux formes sphéri-

(1) Pour le calcul des surfaces équivalentes simples ou complexes, voir *Traçage des métaux en feuilles*, par G. COTANT, Dunod.

ques. La rétreinte des profils quelconques se fait sur des cuillères à vase ou sur des tas exécutés à la demande par l'ouvrier formeur (fig. III-164).

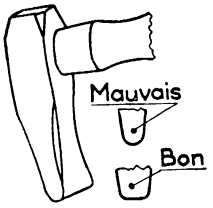



Fig. III-163.
Marteau à rétreindre.

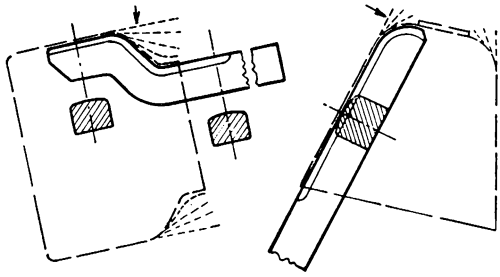


Fig. III-164. — Tas pour rétreinte.

**Rétreinte des tôles minces à froid.** — ***Pièces à fond plat et bord étroit.*** — Lorsque le bord est de faible largeur — 4 à 5 mm pour les petits diamètres, 15 à 20 mm pour les grands diamètres — on rétreint au maillet sur un bordoir (fig. III-165). Un atelier bien outillé possède toute une série de bordoirs aux rayons les plus courants.

Pour un bord étroit, la rétreinte peut être exécutée en une seule passe, mais généralement il faut opérer progressivement en plusieurs passes. Le fond est présenté sur le bordoir comme l'indique la figure III-166, et rabattu ainsi, tout le tour. Par inclinaison graduelle

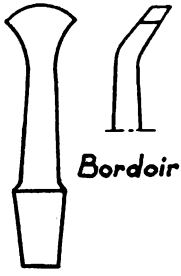



Fig. III-165.

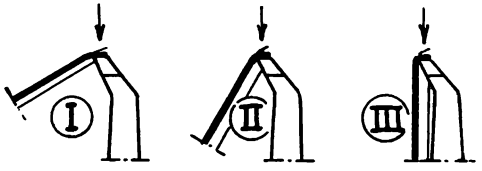



Fig. III-166. — Rétreinte sur un bordoir.

à chaque passe on rétreint à l'angle voulu. Pendant la rétreinte, l'arête du bordoir marque le fond qui se déforme. On corrige ces

déformations en frappant au marteau sur le bord (fig. III-167), puis dans le fond même, *mais très près du bord*, de l'intérieur et de l'exté-

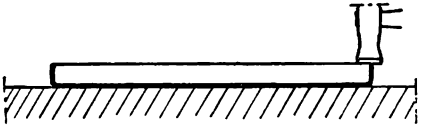


Fig. III-167. — Dressage du bord.

rieur (fig. III-168). La rétreinte provoque un bombage du fond et il ne faut jamais marteler le milieu. On le tend en frappant comme figure III-168-II, s'il est bombé vers l'intérieur, et au contraire, comme figure III-168-I, s'il est bombé vers l'extérieur.

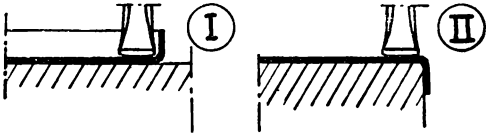



Fig. III-168. — Dressage du fond.

Toutes les opérations de dressage et de correction tendent à augmenter le diamètre du fond et à diminuer la hauteur du bord. Le trait de guidage tracé sur le flan au diamètre extérieur, doit être situé, après rétreinte, au point de tangence de l'arrondi (fig. III-169). De toute façon il est prudent en commençant le travail de tenir le fond un peu faible.

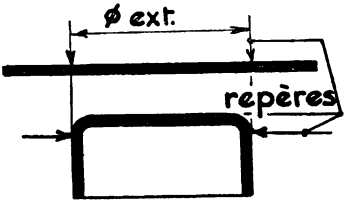



Fig. III-169.

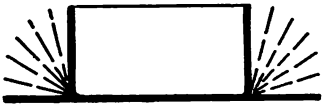


Fig. III-170.

***Pièces à fond plat et bord large.*** — Le bordoir n'est utilisable que pour les bords étroits. Sur un bord plus large, l'arête de cet outil par réaction, déforme le fond et amincit la tôle dans la carre jusqu'à la déchirure.

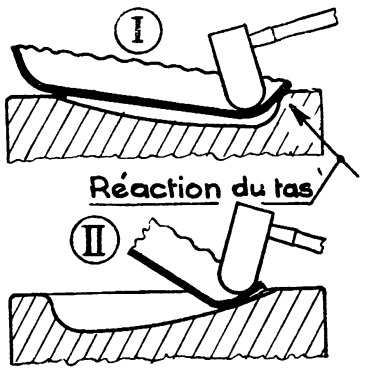



Fig. III-171. — Rétreinte du bord dans un billot.

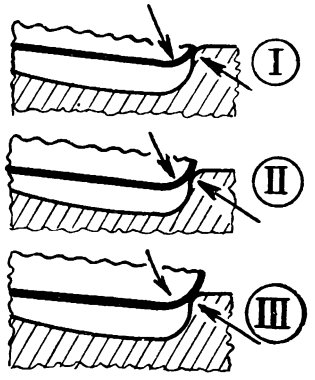



Fig. III-172.

On procède par passes successives de faible importance en donnant des formes coniques intermédiaires très régulières (fig. III-170). On dégrossit au maillet en frappant à défaut de l'intérieur. Dans un billot de forme (fig. III-171) ou une salière, on fait une série de passes circulaires en commençant près du bord (fig. III-171 et III-172). L'arête du billot rétreint le bord, qui se plisse si la tôle est mince, et si la rétreinte est importante. On rétreint les plis dans le billot en frappant de l'intérieur (fig. III-171) en allant de la base du pli, vers le bord. Il ne faut pas frapper dans le fond, mais s'arrêter à la carre. Comme dans les pièces à bord rétreint, le fond est détendu par la rétreinte et on doit éviter toute cause de déformation du milieu, qui exige un travail de correction souvent long et difficile.

***Rétreinte sur bords non plissés.*** — Il convient en premier lieu de marquer la carre et là aussi il est nécessaire de tenir le diamètre un peu faible. On place la tôle sur un tas plat dont le diamètre est aussi voisin que possible de celui du fond et on rétreint sur une largeur de 10 à 30 mm suivant le diamètre. Ce travail exécuté sur l'arête d'un chevalet déforme le fond et amincit la tôle (fig. III-173).

Lorsque la carre est ainsi marquée régulièrement tout le tour, la pièce est présentée sur un chevalet ou une bigorne.

Le coup de marteau ou de maillet est donné *à défaut* (1) tout près

(1) On rétreint parfois à coup portant sur plomb, ou plus rarement sur bois.

du point d'appui (fig. III-174), de 5 à 15 mm suivant l'épaisseur et le diamètre. A chaque coup d'outil la pièce est tournée légèrement

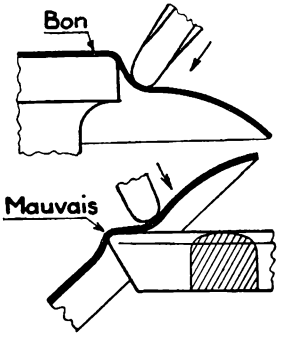



Fig. III-173. — Bonne et mauvaise positions de la pièce pour marquer la carre.

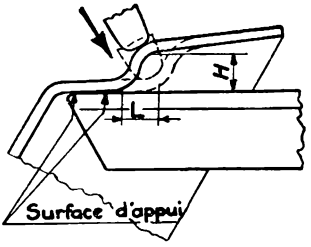



Fig. III-174. — Principe de la rétreinte au marteau.

tout en étant maintenue dans la même position sur le tas pour conserver à l'ensemble une forme régulière.

Il n'y a pas avantage à faire des passes larges en frappant loin du point d'appui ; on augmente ainsi le bras de levier de l'effort exercé, ce qui a pour effet de faire basculer la pièce et de rendre la rétreinte moins efficace.

Sur le croquis III-174 la flèche indique l'inclinaison du coup de marteau qui facilite le déplacement de métal vers le bord. Au maillet on travaille avec le talon (voir fig. III-196). L'arête du tas ne doit pas porter dans le fond, sinon elle marque et amincit.

On approche le bord par passes étroites circulaires et très régulières (fig. III-175). La profondeur $H$ et la largeur $L$ des passes varient de 5 à 20 mm suivant l'épaisseur et le diamètre. Une profondeur de passe insuffisante diminue l'efficacité de la rétreinte en raison de l'élasticité du métal. Avec des passes trop profondes, on risque d'amincir le métal, et en approchant le bord, la rétreinte tendant à diminuer le diamètre, il se forme des plis que l'on régularise pour éviter les « culottes » (fig. III-176). Celles-ci qui, par repliage, peuvent amorcer des cassures, sont d'autant plus à craindre que l'épaisseur est plus faible et la profondeur de passe plus importante.

Pour diminuer les déformations par réaction du tas, il est indispensable de travailler avec une *surface d'appui aussi grande que possible.*

Pour cela, on choisit un tas dont le rayon et le profil sont très voisins de ceux de la surface d'appui (fig. III-177).

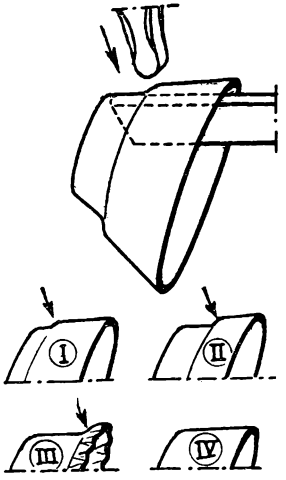



Fig. III-175. — Exécution d'une passe de rétreinte.

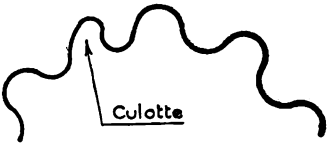



Fig. III-176.

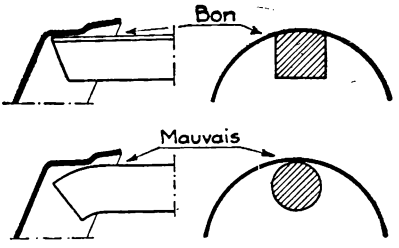



Fig. III-177. — Surfaces d'appui.

Pour être effective la rétreinte doit être très localisée, et pour obtenir ce résultat, il vaut mieux utiliser un marteau ou un maillet relativement léger et frapper plus « sec ». Théoriquement avec un marteau lourd, animé d'une vitesse moindre, on obtient le même travail. Mais il faut tenir compte de l'inertie du tas et de la pièce : la rétreinte sera d'autant plus efficace que la masse du tas sera plus élevée et la masse du marteau plus faible — à condition que cette dernière soit suffisante pour provoquer la déformation.

En rétreignant sur l'extrémité d'une bigorne longue et de faible section, la flexion de cet outil absorbe la majeure partie du travail du marteau.

De plus, avec un marteau ou un maillet lourd, on risque de déformer l'ensemble de la pièce : il se forme des plis, par cintrage, de chaque côté de la surface martelée, sans rétreinte. Le bord de la tôle ne doit pas se déformer pendant le travail et la rétreinte n'intéresse qu'une petite surface.

Il est indispensable de conserver constamment une *forme parfaitement circulaire* et dans tous les cas *très régulière*. Les plats — et les

plis qui se forment de chaque côté du plat — servent d'amorce pour des plis plus importants qui diminuent très sérieusement l'efficacité de la rétreinte.

***Rétreinte sur bords plissés à l'avance.*** — Pour les tôles très minces, et surtout pour l'acier, on exécute volontairement des plis sur toute la surface à rétreindre, dès que l'on a marqué la carre (fig. III-181). On utilise pour le plissage, des pinces rondes, des griffes et des outils à plisser que l'on serre dans un étau (fig. III-178).

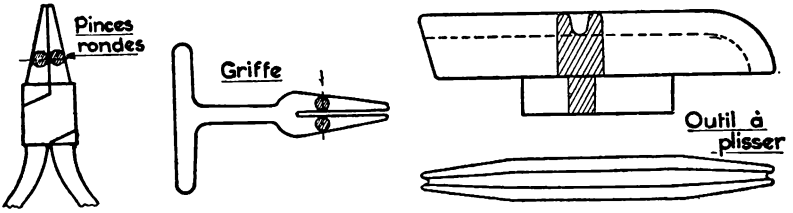



Fig. III-178. — Pinces rondes, griffe et outil à plisser.

Le plissage relève le bord, donne à l'ensemble plus de rigidité et facilite la rétreinte qui est obtenue en frappant sur le pli même (fig. III-179). De plus, les déformations par réaction du tas sont très atténuées, puisque le pli à rétreindre porte sur le tas sur *toute sa longueur*, ce qui diminue la réaction sur la surface d'appui de la figure III-174. Largeur et profondeur des plis = 10 à 15 fois l'épaisseur (fig. III-179). Si la forme des plis n'est pas assez marquée, la rétreinte est insignifiante ; si, au contraire, elle est trop accentuée, on risque la formation de « culottes », puis d'angles vifs qui amorcent des cassures (fig. III-180).

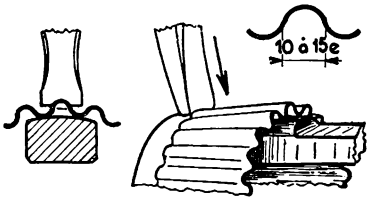



Fig. III-179.
Rétreinte sur bord plissé.

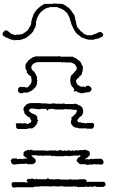


Fig. III-180.
Pli trop marqué.

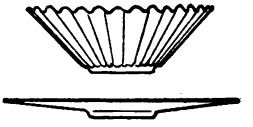


Fig. III-181.
Bord avant et après plissage.

Après chaque passe de rétreinte, on souplane avec un postillon ou un marteau à dresser à tête légèrement bombée. Cette opération a pour but de faire disparaître toute trace de plis, en ramenant l'épaisseur à sa valeur initiale, et de régulariser la forme générale.

Que ce soit avec plis ou sans plis, au début de chaque nouvelle passe, on s'assure que le fond est au diamètre. Celui-ci est tenu un peu faible avec une carre bien arrondie et est approché de la cote exacte dans les dernières passes.

Chaque fois qu'une pièce comporte un bord étiré (bord plat ou bordé en cordon), la rétreinte est arrêtée à la base de ce bord. Les plis qui se forment naturellement pendant la rétreinte faciliteront ensuite l'ouverture du bord qui pourra être exécutée sans étirage (fig. III-182).

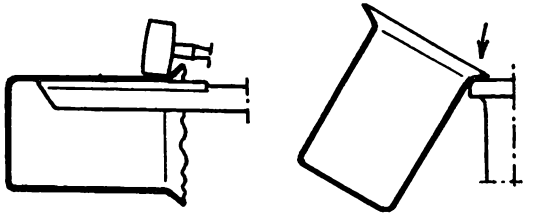


Fig. III-182. — Bord évasé sur pièce rétreinte.

Toutefois, il est nécessaire, avant d'arrêter la rétreinte, de s'assurer que le diamètre extérieur $D$ (fig. III-183) est un peu plus faible que le diamètre final $D_1$ pour permettre le planage (après avoir coupé le bord sensiblement à la longueur).

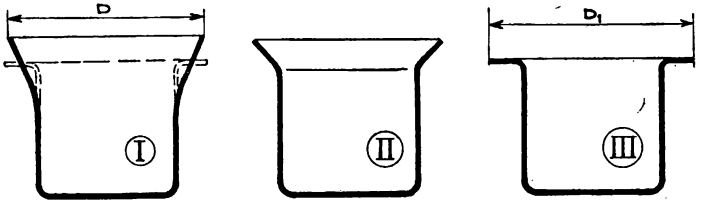



Fig. III-183.

Si le bord plat est large, on le plisse volontairement pour le relever (fig. III-184). Les plis peuvent être très accentués sans inconvénient, puisqu'ils ne sont pas destinés à être rétreints. En rétreignant au voisinage de la carre, sans plisser le bord pour le relever, on risque d'amincir et même de déchirer la tôle (fig. III-185).

Pour le réglage des pièces rétreintes, il est toujours avantageux de disposer d'un tas de la forme exacte, surtout pour le cuivre et les alliages légers. Une forme en bois dur suffit pour un petit nombre de

pièces. Ces formes ne peuvent pas servir à la rétreinte proprement dite, mais elles sont utiles à l'amorçage de chaque passe et pour les faibles déformations de réglage (fig. III-198).

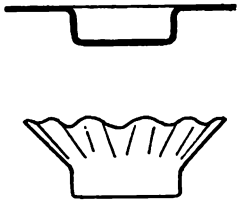


Fig. III-184.

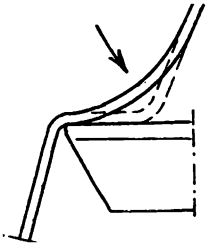


Fig. III-185.

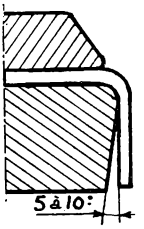



Fig. III-186.

Il est souvent difficile de faire « coller » la tôle sur la forme, en raison de l'élasticité du métal. On prévoit un angle de « dépouille » sur la face de travail : 5° à 10° environ (fig. III-186). On augmente cet angle pour le travail à froid (en général) et pour la rétreinte des métaux ayant une limite élastique élevée (duralumin, inoxydables).

***Pièces de forme sphérique.*** — Ces formes sont exécutées par combinaison d'emboutissage — au milieu — et de rétreinte — au bord.

On dégrossit dans une salière ou un billot (fig. III-187), en frappant au maillet à emboutir de l'intérieur comme il a été vu précédemment (voir fig. III-171 et III-172). Les passes circulaires commencées près du bord forment des plis que l'on rétreint dans le billot ou la salière (fig. III-171). En approchant le milieu, les passes concentriques emboutissent en diminuant l'épaisseur.

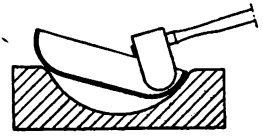


Fig. III-187.

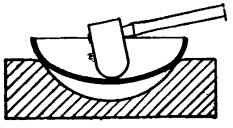


Fig. III-188.

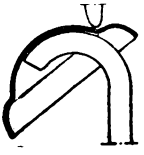


Fig. III-189.

Si l'embouti est peu profond on le termine dans la salière (fig. III-188). Mais pour les emboutis profonds, on forme par rétreinte sur un tas à boule, sur une olive, ou sur un tas de forme en commençant vers le milieu (fig. III-189). Le plissage volontaire du bord facilite le travail des tôles très minces.

A chaque passe de rétreinte, on règle le mieux possible la portion qui est au gabarit et on la souplane parfaitement pour ne plus avoir

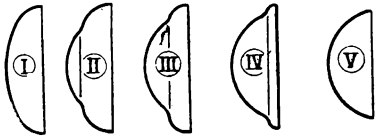



Fig. III-190.

Fig. III-191.

à y retoucher, sauf pour le planage. On obtient ainsi une surface de référence qui va en augmentant à chaque passe et qui, bien maintenue au rond, donne de la rigidité à l'ensemble (fig. III-190).

Il y a avantage à recuire au chalumeau localement et uniquement la surface qui reste à former. Avec les métaux bons conducteurs (cuivre, aluminium) il est difficile d'obtenir un recuit localisé. On y parvient en plongeant dans l'eau la surface terminée (fig. III-191) ; ceci est valable pour toutes les pièces rétreintes et surtout pour les formes profondes.

**Surfaces non développables composées.** — On désigne ainsi les surfaces constituées par des portions de surfaces développables et non développables (1).

En règle générale, on forme en premier lieu les surfaces développables — par pliage ou cintrage — puis on termine par les surfaces non développables — par rétreinte le plus souvent.

***Coin arrondi rétreint.*** — On relève les bords par pliage et on arrondit très largement ces plis dans la surface rétreinte (fig. III-192). Sur un tas plat, on marque la carre bien arrondie, puis sur un chevalet, on rétreint par passes circulaires après avoir plissé pour les tôles

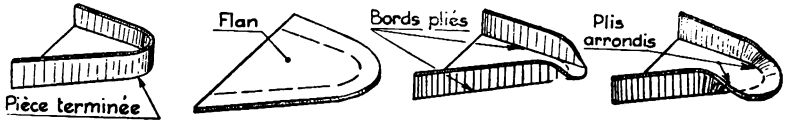



Fig. III-192. — Coin arrondi rétreint.

(1) Pour le calcul et le traçage des flans, voir *Traçage des métaux en feuilles*, par G. COTANT, Dunod.

minces (fig. III-193) ; à noter que les plis 1 sont formés dans la surface plane, hors de l'arrondi. Après réglage, souplanage et recuit local du coin, on recommence ce cycle jusqu'à rétreinte à l'angle désiré ; tenir un peu plus fermé, en prévision du planage.

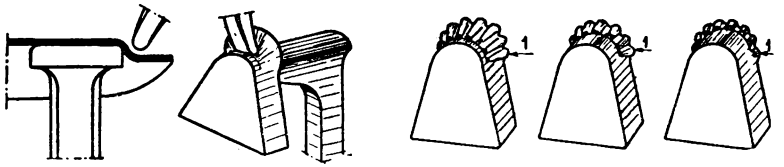



Fig. III-193. — Phases successives de la rétreinte.

Dans ce type de pièce, on rencontre souvent 2 défauts : 1° *Le talon* (fig. III-194) qui se forme surtout dans les premières passes et que l'on prévient en prenant un bord un peu plus large. A chaque passe, on fait disparaître le talon et on s'assure que *la carre est bien au gabarit et aux cotes.* 2° *Cintrage des bords aux points de tangence* : ceci est dû à la rétreinte insuffisante de part et d'autre de l'arrondi. On y remédie en faisant *à l'intérieur* un pli que l'on accentue par flexion du bord, et que l'on rétreint ensuite de l'intérieur (fig. III-195).

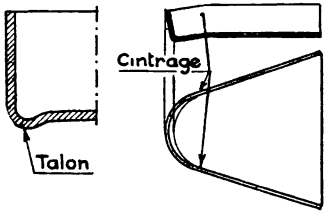



Fig. III-194.

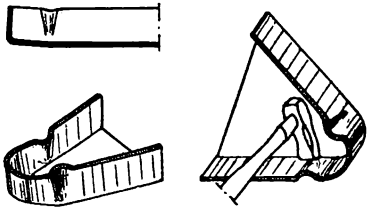


Fig. III-195. — Correction des bords cintrés.

*Réflecteur.* — On cintre la surface cylindrique, puis on dégrossit dans une salière (fig. III-196). Ensuite on marque le fond de la calotte

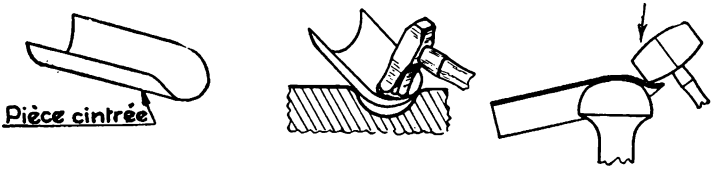



Fig. III-196. — Mise en forme d'un réflecteur.

sphérique sur une boule et on rétreint comme une calotte sphérique par passes étroites semi-circulaires (fig. III-197).

Comme pour le coin rétreint, on observe la formation d'un talon et on s'efforce de régler et de maintenir la zone centrale au gabarit dès le début de la mise en forme.

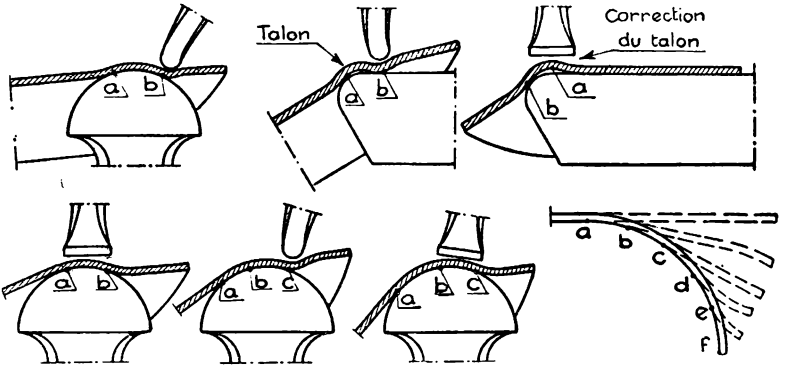



Fig. III-197. — Phases successives de la rétreinte du réflecteur.

Pour tous ces travaux, une forme exacte avec contreforme permet un réglage aux cotes beaucoup plus rapide. Sauf pour les faibles déformations, il n'est pas possible de rétreindre sur la forme en une seule passe : il se formerait des plis trop profonds et des « culottes ».

Sur la forme on rétreint une petite surface bien réglée et dès que les plis sont suffisamment marqués, on démonte la pièce et on rétreint sur un tas de forme (fig. III-198). Après souplanage et recuit, on fait les passes suivantes dans les mêmes conditions.

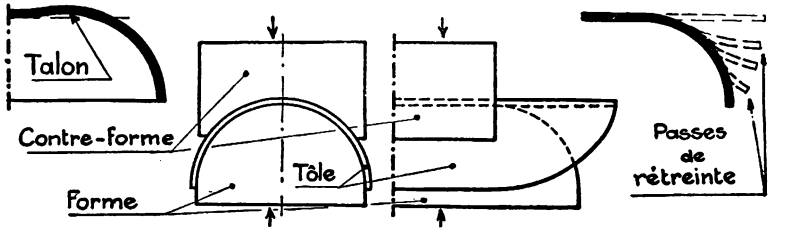



Fig. III-198. — Rétreinte sur forme exacte.

***Protecteur.*** — La figure III-199 donne un exemple de surface composée, exécutée sur forme exacte. Cet outillage est réalisé rapi-

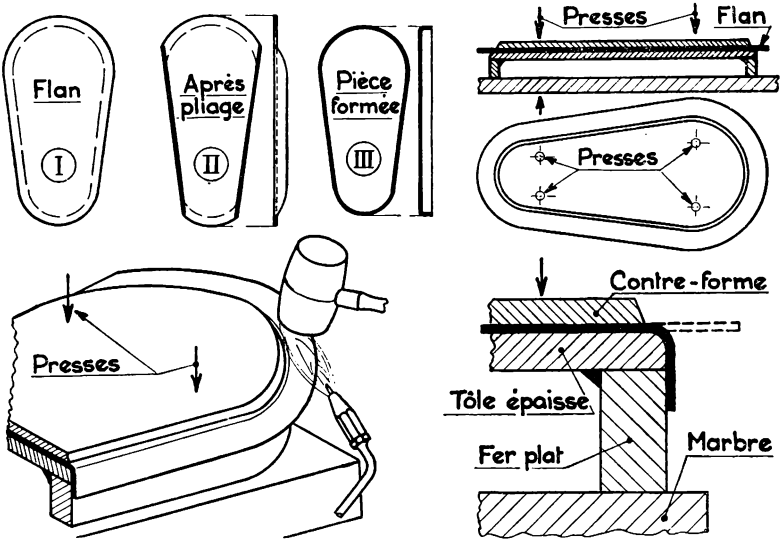



Fig. III-199. — Outillage et mise en forme d'un protecteur.

dement, avec une tôle coupée au chalumeau et un fer plat cintré au profil, le tout soudé à l'arc. Les bords droits du flan sont relevés à la plieuse (II), puis la tôle est serrée avec des presses entre la forme et la contre-forme. Les bords arrondis sont rétreints à froid (petits bords en tôles minces) ou à chaud, par chaudes partielles au chalumeau.

***Bord plié, cintré sur champ intérieurement.*** — Pour cintrer un bord déjà plié à la plieuse (fig. III-200), on le coude par pression à

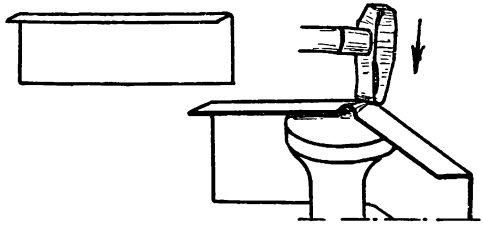


Fig. III-200. — Rétreinte d'un bord plié.

l'endroit désiré. Il se forme un pli que l'on rétreint sur un tas plat, rond ou ovale. Le rayon du cintrage varie avec le nombre et l'écartement des plis exécutés et rétreints.

**Rétreinte à chaud.** — Pour les aciers, les inoxydables et le cuivre, la rétreinte à froid devient difficile à partir de 2 à 3 mm. Le duralumin et les duralinox se travaillent à chaud, même en faible épaisseur, lorsque les déformations sont importantes.

Le maillet est préféré au marteau qui marque profondément la tôle. Les tas et les outils de forme sont les mêmes que pour la rétreinte à froid.

Dans la mesure où la chose est possible il y a avantage à ne chauffer que la surface à rétreindre, et à maintenir froides les parties voisines et particulièrement la surface d'appui. Cette façon d'opérer supprime les déformations par réaction du tas, mais n'est guère applicable aux métaux bons conducteurs.

Les chalumeaux permettent un chauffage localisé tout indiqué pour la rétreinte. C'est le seul moyen de chauffage employé pour les tôles minces d'alliages légers.

Pour le contrôle de la température de travail de ces alliages, on peut utiliser le suif ou le savon de Marseille. Mais avec un peu d'habitude on apprécie la température en « sonnant » le métal. Pendant le chauffage, qui s'exécute sur la pièce montée sur la forme, on frappe doucement avec le marteau ou le maillet, sur la tôle qui fait ressort et rend un son clair à froid. Au fur et à mesure que la température s'élève, le son devient plus mat et la tôle « mollit » sous les coups de marteau.

C'est surtout sur forme exacte que l'on rétreint à chaud. La tôle est serrée entre la forme et la contre-forme à l'aide de presses, de vis, ou mieux de clavetages ou de cames (voir fig. III-199).

Comme dans le travail à froid, on démonte la tôle une ou plusieurs fois si c'est nécessaire pour rétreindre les plis lorsque la rétreinte est trop importante.

Les pièces en acier formées à chaud sont planées sur forme au maillet, rarement au marteau. Généralement, la pièce terminée est recuite pour améliorer l'homogénéité du métal, en faisant disparaître les contraintes résiduelles laissées par la mise en forme. Pour le duralumin, il faut nécessairement terminer par une trempe.

**Surfaces non développables formées à partir de cônes et de cylindres.** — Les exemples les plus simples ont été étudiés au chapitre Étirage (bords en collet, gorges, etc.). Lorsque la déformation

est importante, et intéresse la totalité ou la majeure partie de la surface, on cherche la surface équivalente développable qui réduit au minimum les difficultés de mise en forme, en combinant la rétreinte et l'emboutissage.

Comme dans les pièces formées à partir de flans plats, la surface équivalente, est en principe, égale à la surface non développable correspondante.

*Exécution.* — Le développement est cintré et soudé suivant une génératrice. Il est avantageux surtout pour les métaux non ferreux, de laisser un excès de métal qui sera coupé après soudage pour supprimer toute cause d'amorce ultérieure de cassures (fig. III-201).

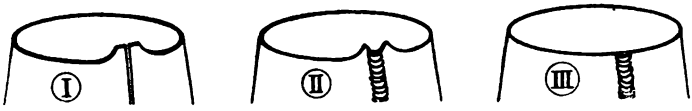



Fig. III-201.

En principe, on commence par le milieu, exécutant ainsi une gorge qui, bien calibrée et bien arrondie, donne de la rigidité à la pièce et

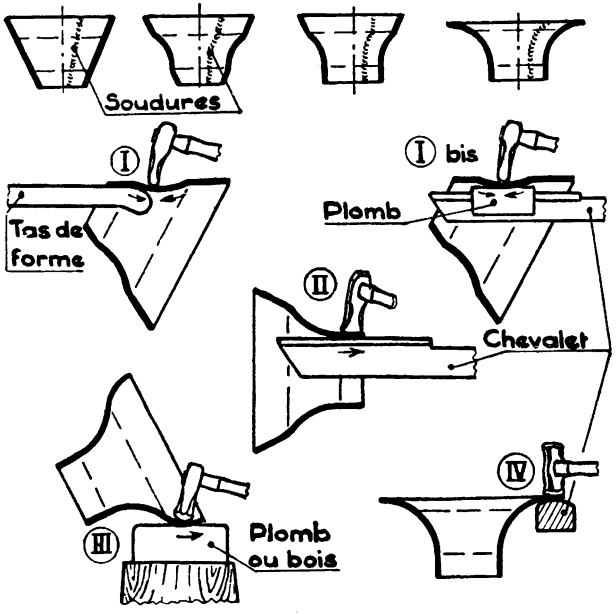



Fig. III-202. — Mise en forme d'un pavillon évasé.

sert de base de référence pour la mise en forme ultérieure (croquis I des figures III-202 et III-203). Tout le travail doit être conduit avec *une très grande régularité* par passes circulaires guidées par des traits que l'on trace à l'avance sur la pièce.

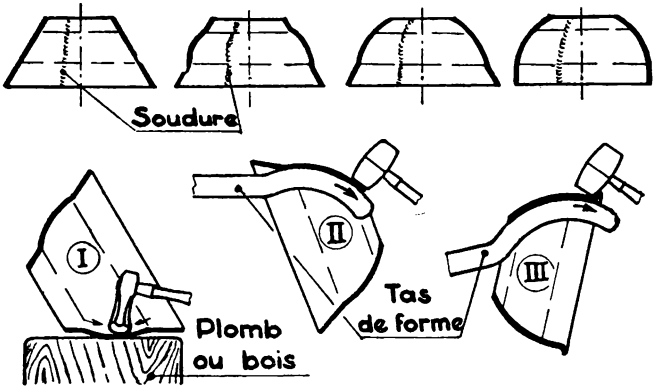



Fig. III-203.

Les figures III-202 et III-203 donnent des exemples de pièces formées. La rétreinte se fait à défaut ou sur plomb, au marteau généralement et au maillet pour les métaux légers et les faibles déformations. Les règles énoncées précédemment pour l'étirage et la rétreinte sont valables. De plus, il faut ménager les soudures, toujours plus fragiles que le métal ; on les emboutit ou on les étire à coup portant sur tas acier — et non à défaut — et en rétreinte, on évite de former un pli juste sur la soudure.

## Simplification de la mise en forme par le soudage.

Le travail à la presse et au tour à repousser, sont les seuls procédés qui conviennent pour les fabrications de série, mais il n'est pas toujours possible d'utiliser ces machines : séries insuffisantes, formes spéciales, dimensions des pièces à réaliser, etc.

Dans les petites séries les mises en forme importantes, coûteuses et difficiles, en particulier pour les inoxydables, sont évitées le plus possible par les fabrications en plusieurs éléments assemblés par soudage.

***Récipient cylindrique à fond plat.*** — La solution I est acceptable en tôles moyennes et épaisses pour pièces *sans fatigue*. La solution II est la meilleure ; hauteur du bord = 10 à 20 *e*. La solution III convient pour les tôles minces et moyennes.

Un carter peut être soudé comme l'indique la figure III-205.

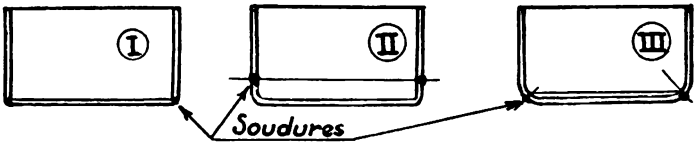



Fig. III-204. — Fond soudé sur virole.

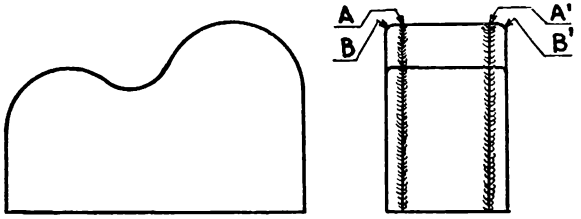



Fig. III-205. — Carter soudé. Soudures en A ou en B.

***Récipient cylindrique avec bord*** (fig. III-206). — L'ensemble comprend une virole *F*, un fond *E* et une collerette *D*. Le fond et la collerette peuvent être formés dans la même tôle qui est tronçonnée suivant *ab*. On assemble les 3 éléments *D*, *E*, *F* par soudage.

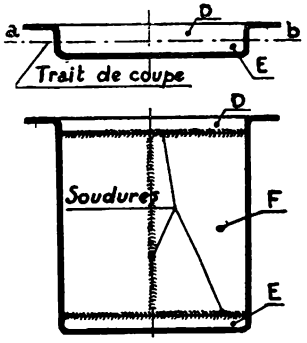



Fig. III-206.

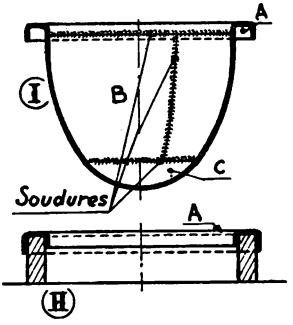



Fig. III-207.

***Récipient embouti*** (fig. III-207). — On fait la pièce en 3 éléments. Le fond *C* (calotte sphérique) est embouti facilement dans une salière

(voir fig. III-188). La virole *B* est formée en partant d'un tronc de cône (voir fig. III-203). On exécute la collerette *A* sur forme exacte à partir d'une couronne (fig. III-207) ou au tour à repousser. La chute centrale de la couronne peut être récupérée pour le fond.

## Calibrage et contrôle des pièces formées.

Le gabarit plat est le calibre le plus simple — un pour l'extérieur et un pour l'intérieur. Un seul jeu suffit pour les surfaces de révolution (fig. III-208).

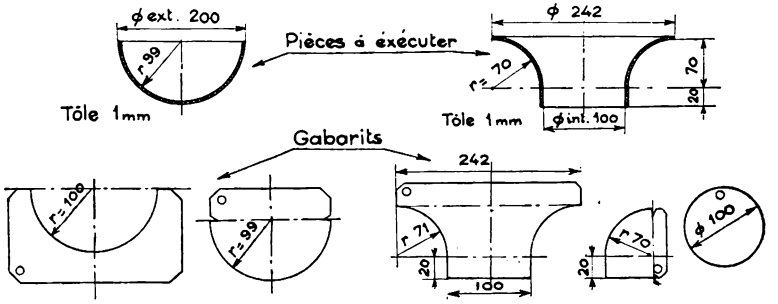



Fig. III-208. — Gabarits.

Pour les autres surfaces il faut 2 jeux de calibres. Les formes dans les 2 sens — suivant le diamètre et suivant le profil — sont liées et il faut toujours présenter les 2 gabarits pour contrôler la forme.

Mais pour toutes les formes, la maquette est l'outil de calibrage parfait. C'est un ensemble de gabarits maintenus dans leurs positions respectives sur une tôle rigide (fig. III-209). La tôle doit porter partout sur la maquette. Des trous percés dans toutes les cloisons permettent de contrôler la forme. Les maquettes sont en acier ou en duralumin ou parfois en contre-plaqué pour les alliages légers que l'acier risque de rayer.

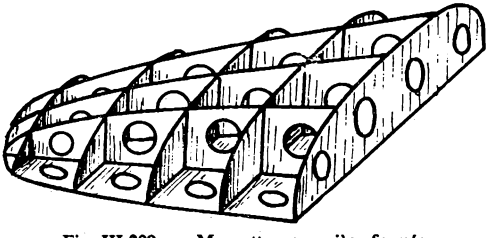


Fig. III-209. — Maquette pour pièce formée.

## LE PLANAGE

Les pièces formées en tôle mince à la main sont presque toujours planées. Le planage augmente la résistance mécanique de la tôle par écrouissage du métal. De plus, par le planage, on termine la mise en forme et on améliore l'état de la surface en faisant disparaître les coups et les irrégularités laissés par l'emboutissage et la rétreinte.

Les pièces en cuivre, en laiton, en alliages légers, en aciers inoxydables, sont polies par la touche du marteau et du tas qui, à cet effet, sont également polis. On obtient ainsi « le poli gras » des chaudronniers en cuivre, uniquement par le planage avec des marteaux aussi plats que possible (facettes peu apparentes). Avec des marteaux plus bombés, on fait du « martelé » serré ou détaché (coups espacés).

Les tôles moyennes et épaisses en acier, sont planées au maillet, à chaud, et sont généralement recuites avant leur mise en service.

**Outillage.** — ***Planage à la main.*** — On utilise des marteaux et des battes en acier (fig. III-30) aussi plats que possible sauf pour les surfaces concaves. Les tas ont une forte masse pour bien « porter

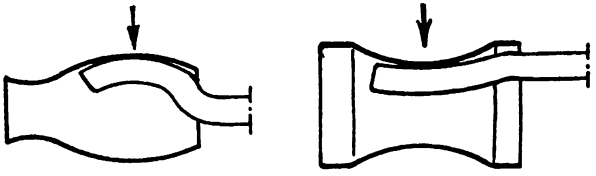


Fig. III-210.

coup ». Le tas ne doit pas avoir la forme exacte de la pièce à planer, sinon on « creuse ». *La tôle ne doit porter — sur le tas — que sur une petite surface* qui peut avoir une forme très voisine de celle de la pièce. Ceci oblige à utiliser des tas dont la forme est indiquée sur la figure III-210.

Pour faciliter le planage des rayons variables, les tas à boule ont une forme irrégulière (fig. III-211).

***Planage à la machine.*** — Le martinet est l'outil le mieux adapté à ce travail. Suivant la forme ou le rayon d'emboutissage (voir dressage) on change l'enclume (fig. III-212), le marteau restant le même

pour tous les travaux. Pour les emboutis, la chabotte est montée sur billot comme pour le dressage. Lorsqu'il s'agit de planer une virole on fixe la chabotte sur une poutre ou une console (fig. III-213).

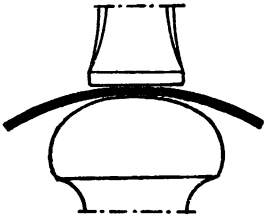


Fig. III-211.

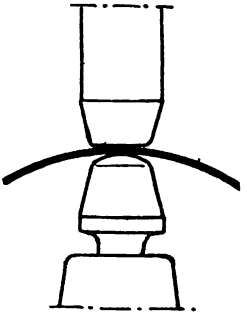


Fig. III-212.

## Méthode de planage.

La régularité du martelage s'impose ici, plus encore que dans toute autre opération de rétreinte ou d'emboutissage.

Avant de terminer la mise en forme il faut tenir compte de l'allongement dû au planage. Une virole sera tenue faible en diamètre avant le planage : l'allongement variera avec le diamètre, l'importance des coups à faire disparaître, et le degré d'écrouissage recherché.

Un bord rétreint est un peu plus fermé qu'à la forme définitive (fig. III-214), le planage ouvrira. Par contre, un bord étiré n'est pas rabattu complètement à la panne (II), c'est en planant que l'on terminera l'ouverture du bord.

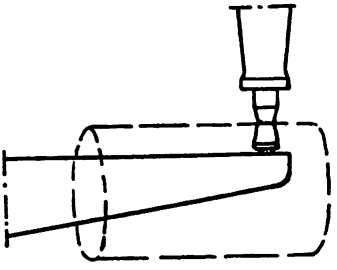


Fig. III-213.

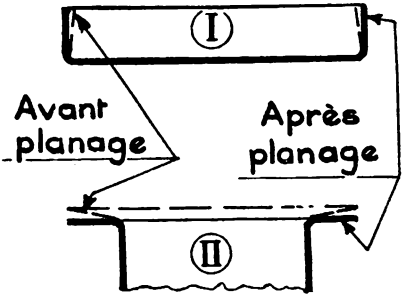



Fig. III-214.

Pour planer une pièce circulaire ou une virole, on commence au milieu et on approche le bord par passes circulaires ou séries de passes circulaires (voir fig. III-136).

Dans le planage d'un fond plat à bord rétreint, il faut marteler le milieu du fond avec précaution.

Le planage uniforme d'une surface ne produit pas une déformation régulière et on peut observer que les bords se déforment beaucoup plus facilement que le milieu.

Dans une virole martelée régulièrement, la partie centrale reste cylindrique (fig. III-215), avec une légère augmentation du diamètre,

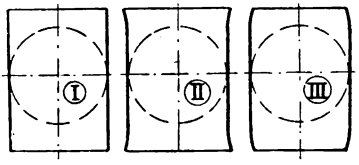



Fig. III-215.

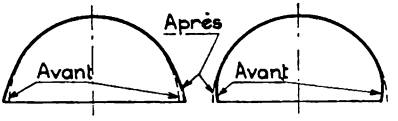



Fig. III-216.

mais les bords s'évasent sensiblement (II). Il faut arrêter le martelage à quelques centimètres du bord, ou si l'on veut marteler partout pour écrouir, il est nécessaire de rétreindre légèrement les bords avant planage (III).

Dans une pièce non développable, le planage modifie très peu la forme, sauf sur les bords, ce qui oblige à les rétreindre un peu plus avant le planage (fig. III-216).

C'est au coup d'œil et au toucher que le planeur apprécie la régularité de son travail dont le contrôle final se fait sur maquette (fig. III-209).

# MISE EN FORME DES SURFACES NON DÉVELOPPABLES A LA MACHINE

## MACHINES SEMI-AUTOMATIQUES

Ces machines travaillent par déformation localisée et progressive, et souvent par passes successives.

**Étirage au martinet.** — Le martinet est à tous points de vue préférable au marteau pour l'emboutissage à coup portant de tôles de faible épaisseur (grandes surfaces galbées ou gauches). Tout ce qui a été dit pour le dressage des tôles est applicable à l'emboutissage. On opère par passes parallèles avec coups plus serrés au milieu de l'embouti.

**Étirage sur machine à galets presseurs.** — La tôle est déplacée par tractions alternées, entre deux galets superposés et de formes variables (fig. III-217) ; par leur pression, les galets allongent

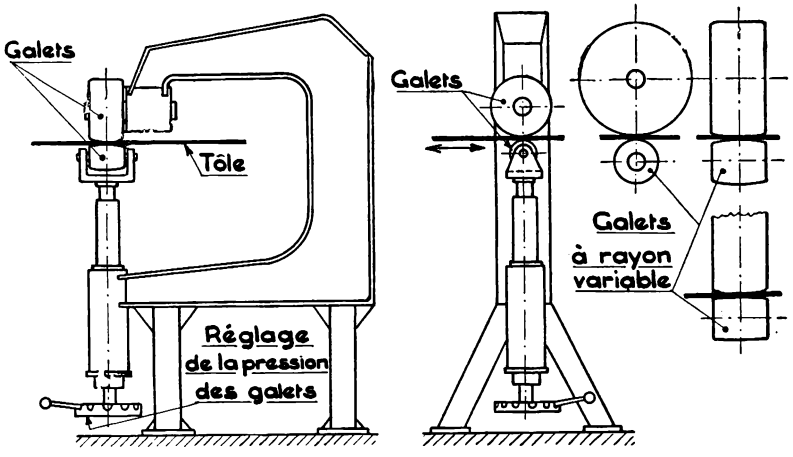



Fig. III-217. — Machine à galets presseurs.

le métal sans marquer la tôle comme au martinet. Ces machines sont surtout utilisées pour les grandes surfaces galbées ou gauches, en alliages légers.

**Étirage ou rétreinte de petits bords sur une machine à cintrer** (viroles). — Si le bord est de faible largeur, avant cintrage de la virole, on plie le bord à la plieuse et on roule en logeant le bord ainsi rabattu dans des saignées ménagées dans les rouleaux.

Pour les bords plus larges, on roule d'abord la virole. Puis, on équipe les rouleaux de frettes disposées à l'écartement nécessaire (fig. III-218), et on forme le bord, la machine en rotation, par descente progressive du rouleau supérieur.

On peut faire des bords « en fond » (rétreints), ou « en collet », (étirés), ou des « soyages » pour emboîtage (fig. III-218).

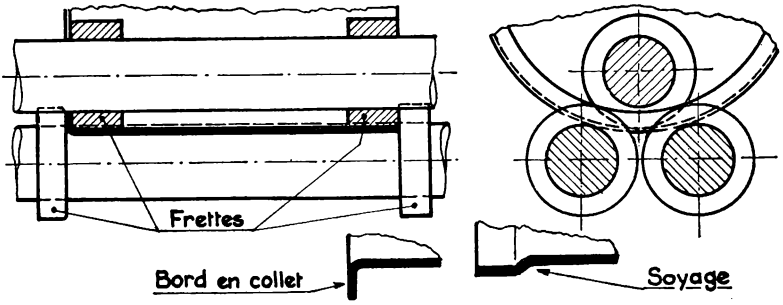



Fig. III-218. — Rétreinte d'un bord sur virole.

**Machines à former à mors mobiles.** — La déformation est très localisée, de faible importance et très rapide (100 à 300 coups à la minute).

Le travail est exécuté par deux jeux d'outils symétriques et superposés (fig. III-219 à III-221) : le jeu inférieur fixe et le jeu supérieur monté sur un coulisseau vertical de faible course ($\approx$ 10 mm). Il est possible de régler en hauteur l'outil inférieur pour faire varier la pression et, par suite, l'importance de la déformation.

La tôle est serrée entre les mors qui sont striés — afin d'éviter le glissement — puis les mors sont rapprochés (rétreinte) ou écartés (étirage). Le mouvement horizontal des mors est obtenu, soit par un

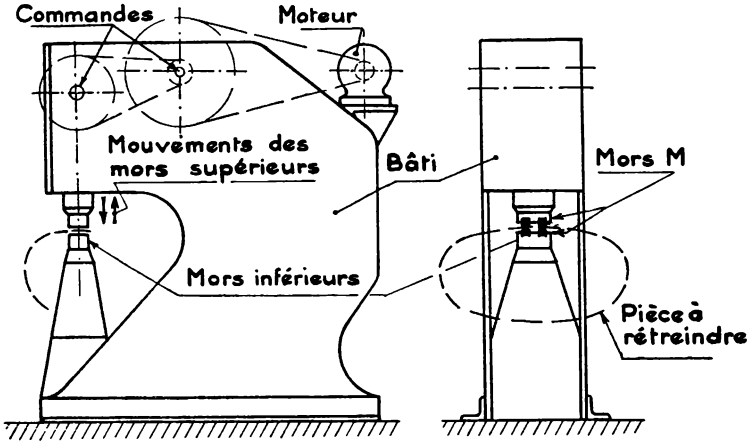



Fig. III-219. — Machine à former à mors mobiles.

jeu de lames glissant sur des rampes (fig. III-220), soit par le déplacement de lamelles encastrées dans un bloc de caoutchouc qui est écrasé par la pression (système Eckold, fig. III-221).

*Outils à rétreindre* (fig. III-220 et III-221). — Les mors se rapprochent et agissent par refoulement.

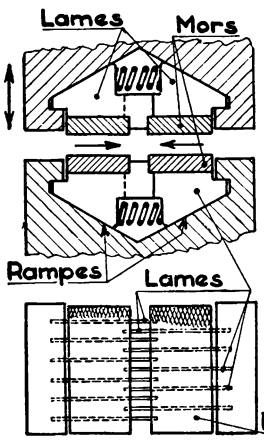



Fig. III-220.

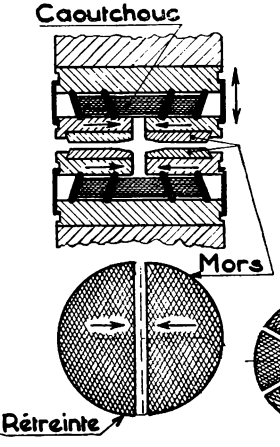



Fig. III-221.

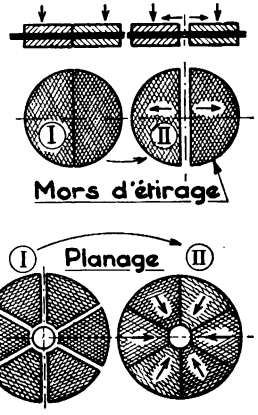



Fig. III-222.

***Outils à étirer*** (fig. III-222 en haut). — Les mors s'écartent et, dans ce cas, les rampes ou les lamelles sont inclinées en sens inverse des précédentes.

***Outils à planer*** (fig. III-222 en bas). — Les six mors indépendants refoulent le métal, en se rapprochant simultanément du centre de l'outil.

Dans tous les cas, il faut travailler par passes régulières et très progressivement.

Avec des outils à rétreindre, il est possible de cintrer une cornière (ou un bord plié), comme le montre la figure III-223, ou en sens inverse, avec des outils à étirer (fig. III-224).

On peut « rattraper » les bords détendus ou rétreindre les bords des emboutis, à l'aide des mors de rétreinte (fig. III-225).

Ces machines sont surtout utilisées pour les tôles minces, et les alliages légers, malgré leur inconvénient de marquer la tôle par les stries des mors.

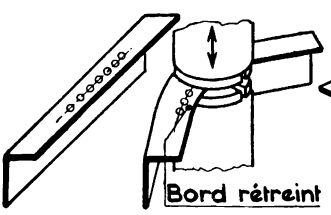



Fig. III-223.

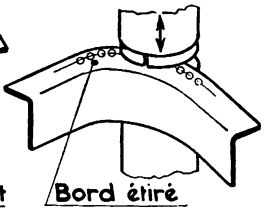



Fig. III-224.

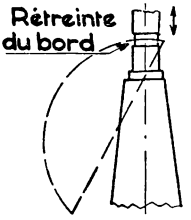



Fig. III-225.

**Machines à déformation progressive.** — Les outils très simples (fig. III-226 à III-229) peuvent être montés sur des machines spéciales, mais aussi à la place des lames de cisailles alternatives ou de poinçons de grignotage (voir fig. II-30 et II-45). L'outil supérieur est animé d'un mouvement vertical alternatif de faible amplitude et l'outil inférieur est réglable en hauteur.

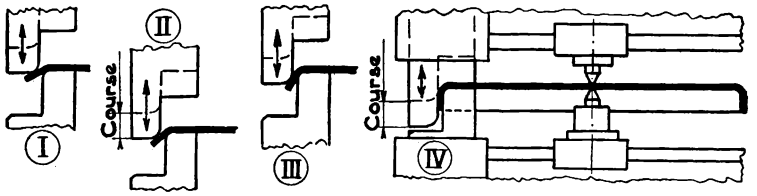



Fig. III-226.

En utilisant un guide circulaire, on peut rétreindre le bord sur un fond ; à chaque tour du fond (manœuvré à la main), on remonte légèrement l'outil inférieur (fig. III-226-I à IV). De la même façon, on peut faire un bord en soyage (fig. III-227). L'étirage d'un bord en collet avec butée arrière (fig. III-228) est moins facile à réaliser. Avec des outils sphériques, on peut emboutir (étirage) par passes concentriques (fig. III-229). Ces outils ne conviennent que pour les faibles déformations.

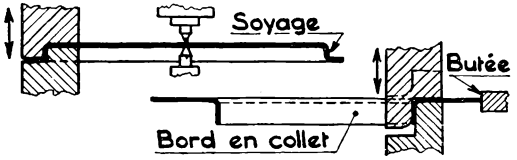



Fig. III-227.




Fig. III-228.

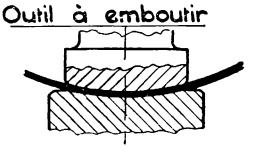



Fig. III-229.

**Étirage de collets dans un cylindre.** — Pour éviter les soudages d'angles dans les piquages, on étire les collets à l'aide d'une poire (fig. III-230) ; sur un support en tôle soudée, on fixe un vérin hydraulique ; la poire est engagée dans un avant-trou (I) puis elle est tirée lentement par le vérin (II à IV). Un chauffage local au chalumeau est nécessaire pour les tôles épaisses et les alliages légers. Le bord obtenu est parfaitement calibré.

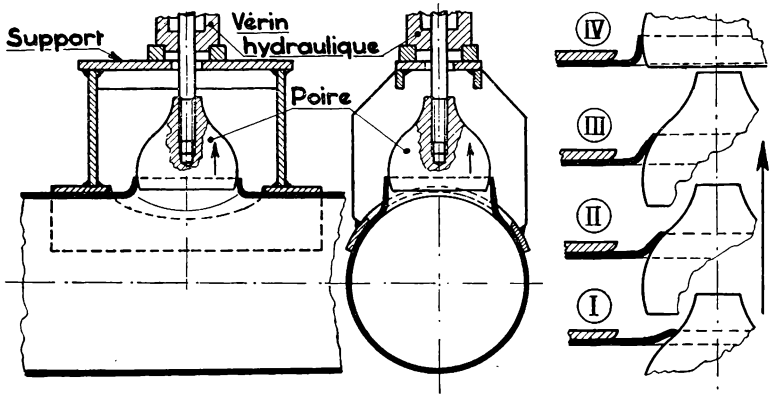



Fig. III-230. — Collet étiré pour amorce de piquage.

Pour faire le même travail, il existe des machines où la poire est remplacée par une tête portant des billes, en nombre variable suivant le diamètre du collet. Les billes, entraînées par la tête en rotation, étirent le collet par leur montée progressive.

## Mise en forme sur machines à galets.

***Étirage de petits bords sur machine à moleter*** (fig. III-231). — Sur ces machines, on peut étirer des collets de faible largeur, avec des molettes spéciales, par inclinaison progressive de la virole. Cette

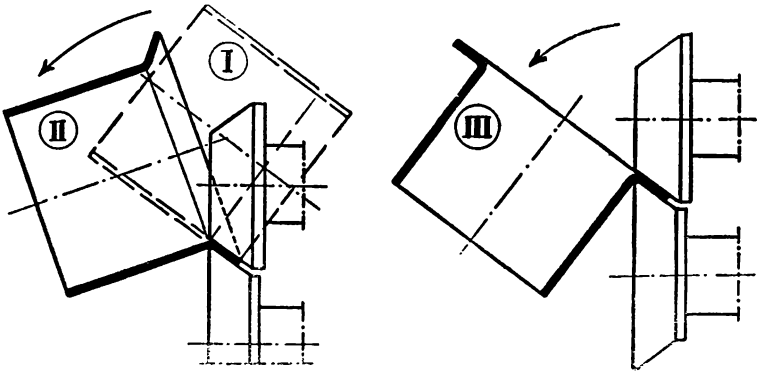



Fig. III-231. — Ouverture d'un collet dans un cylindre sur une machine à moleter.

opération exige un guide pour régler la largeur du bord, et une butée, pour éviter le faux rond dans la virole pour faibles déformations.

Plus couramment, on utilise les molettes de la fig. IV-27 (agrafage).

***Rétreinte sur machine à moleter.*** — Le flan circulaire est fixé, en son centre, par un guide circulaire (fig. III-232). Le bord est engagé entre deux molettes de forme spéciale, qui entraînent la tôle par leur rotation. Après chaque tour du fond, le *guide est* légèrement *relevé*, autour d'un axe qui passe par le centre du rayon de carre. Une barre d'appui maintient le fond pendant la rétreinte ; néanmoins un dressage est souvent nécessaire.

Applicable aux tôles minces et moyennes, et fonds de petits et moyens diamètres ; toutefois, il existe de très grosses machines à rétreindre les bords, qui fonctionnent suivant le même principe.

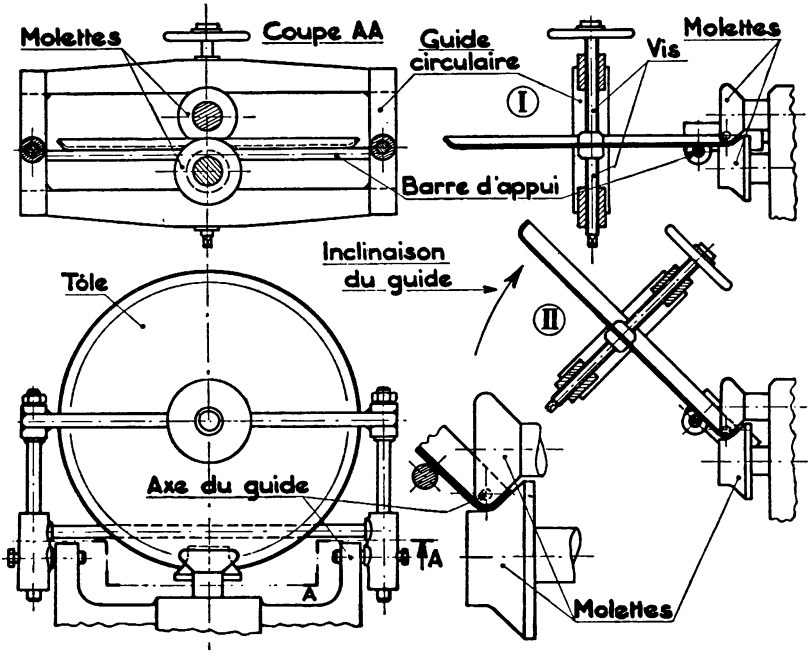



Fig. III-232. — Guide circulaire pour rétreinte d'un bord sur machine à moleter.

*Machines à rétreindre à galets* (fig. III-233). — Le travail sur ces machines présente des analogies avec le repoussage au tour, mais au tour, la tôle est entraînée par le mandrin central, et non par les galets. Le flan qui peut être plan ou sphérique, est maintenu, en son

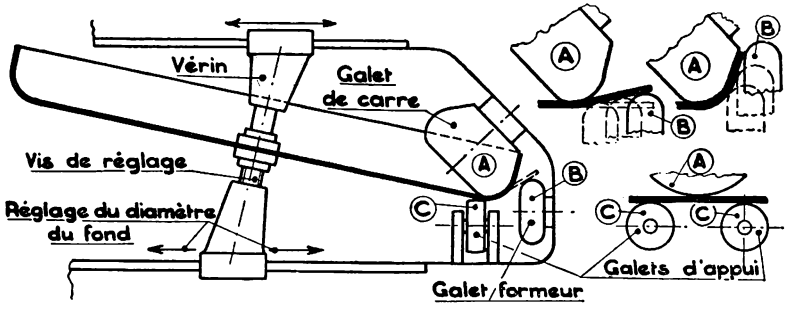



Fig. III-233. — Machine à rétreindre à galets.

centre, par un vérin. Un galet intérieur *A*, au rayon de carre, sert de mandrin et entraîne la tôle avec les deux galets d'appui *C*. Le galet formeur *B* mobile — par son déplacement — rétreint le bord progressivement sur le galet de carre (fig. III-233). On règle le diamètre du fond par le déplacement du vérin central, et il faut un galet *A* pour chaque rayon de carre.

Des machines très puissantes peuvent rétreindre des bords sur des fonds de 2 à 3 m de diamètre, et de près de 20 mm d'épaisseur.

## REPOUSSAGE AU TOUR

Le repoussage au tour est un procédé de mise en forme des métaux en feuilles, permettant des déformations très importantes, et applicable à tous les métaux et alliages de laminage mais particulièrement au cuivre, au laiton, à l'aluminium et aux duralinox.

**Principe.** — On fait tourner à grande vitesse une tôle circulaire appelée flan, serrée sur un *mandrin* de forme, par une pièce de bois appelée « *centre* » ou « tampon » (fig. III-234). Avec un outil, on exerce, sur le flan en rotation, une pression qui tend à lui faire épouser la forme du mandrin.

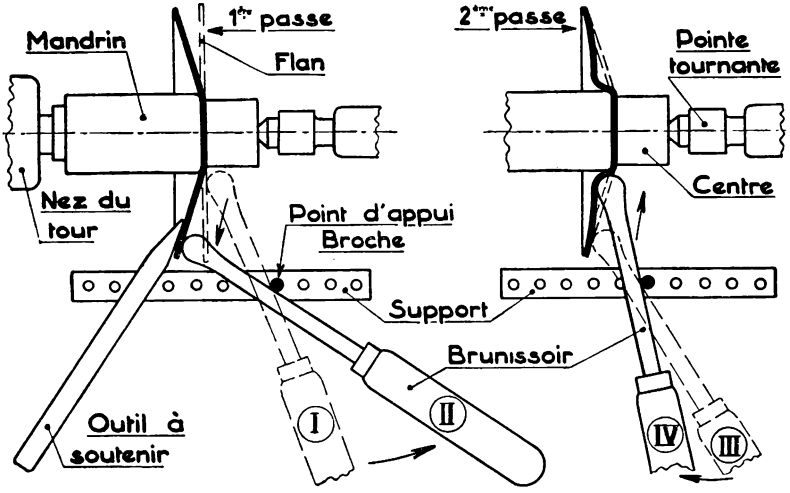



Fig. III-234. — Mode d'action de l'outil.

La mise en forme est obtenue très progressivement et par passes successives (fig. III-235). L'outil travaille alternativement dans les 2 sens : du fond vers le bord et du bord vers le fond (fig. III-234).

Pour les aciers, le duralumin, les inoxydables et les tôles épaisses en général, on remplace l'outil par une molette montée sur un chariot qui se manœuvre comme celui d'un tour parallèle (fig. III-240).

Il y a beaucoup d'analogie entre le repoussage au tour et la mise en forme à la main : la pression de l'outil remplace le choc du marteau et les formes intermédiaires sont presque identiques.

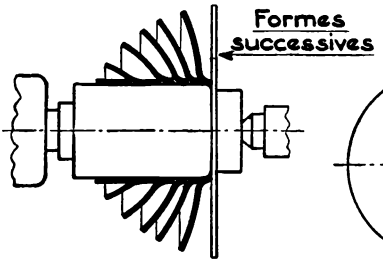



Fig. III-235.

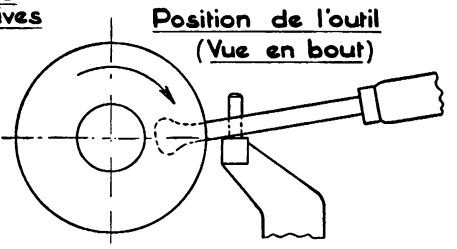



Fig. III-236.

***Calcul des surfaces équivalentes.*** — En principe, l'épaisseur ne doit pas être modifiée et, par suite, la surface du flan est égale à la surface de la pièce finie (voir fig. III-162). Souvent, on amincit ou on épaissit volontairement ; dans ce cas, les calculs sont faussés et il faut faire quelques essais.

**Outillage.** — Le repoussage exige un tour robuste pour éviter les vibrations dues aux grandes vitesses de rotation. De bons roulements sont indispensables. Un cône étagé *C* donne les différentes vitesses et une pointe tournante est montée sur la poupée mobile (fig. III-237).

Hauteur de pointe 200 à 250 mm.

Vitesses de 500 à 3 000 tr/mn. La vitesse varie avec le diamètre de la pièce, l'épaisseur et la nature du métal, le lubrifiant, etc. Vitesse circonférentielle de 400 à 900 m/mn.

Le mandrin *M* monté sur le nez du tour est une pièce en bois — ou mieux en métal — qui est tournée à la forme intérieure de l'objet à repousser. Le bois se tourne aisément sur le tour même. Les mandrins métalliques sont plus coûteux, mais ils ne se déforment pas comme les mandrins bois et ils sont pratiquement inusables.

Par la pression de la pointe tournante *T*, on immobilise le flan *F* entre le mandrin *M* et le centre *C* (ou tampon) qui est une pièce de bois dur, à la forme du fond du mandrin.

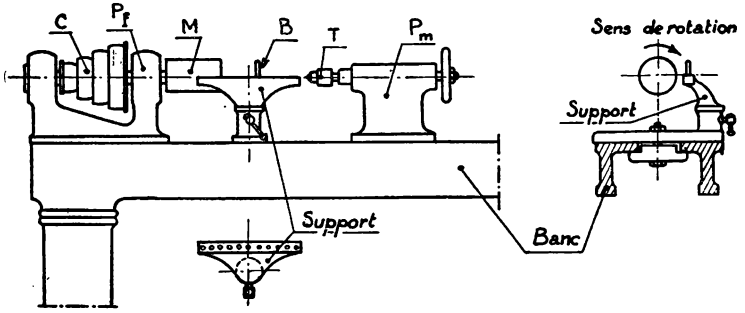



Fig. III-237. — Schéma d'un tour à repousser.
$P_f$, poupée fixe. $P_m$, poupée mobile. *C*, cône étagé. *M*, mandrin. *T*, pointe tournante. *B*, broche.

Le support est percé de trous dans lesquels on peut déplacer une ou plusieurs broches coniques ou à épaulement.

Les outils les plus employés sont : le *brunissoir* (fig. III-238) qui sert

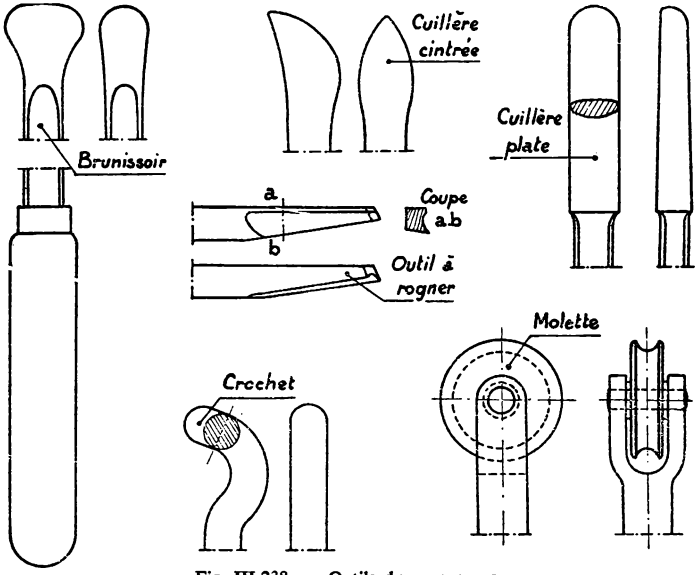



Fig. III-238. — Outils du repousseur.

à coucher le bord et à former la pièce, la *cuillère cintrée* pour travailler là où le brunissoir est trop large, la *cuillère plate* qui lisse et polit en faisant disparaître les rayures laissées par le brunissoir, et l'*outil à rogner* avec lequel on coupe et ajuste les bords. Il existe d'autres outils moins employés : ce sont le *brunissoir plat*, le *crochet*, les *pinces*, les *molettes* pour les contours et pour les gorges, etc. (fig. III-238). Tous ces outils sont en acier dur traité et poli d'une façon parfaite pour ne pas rayer ou gripper.

On utilise aussi des outils en bois dur surtout pour remplacer le brunissoir.

Avec un morceau de bois, appelé *outil à soutenir* (fig. III-239) on maintient l'envers de la tôle. L'ouvrier s'attache avec une sangle pour augmenter l'effort appliqué et diminuer la fatigue. Il porte sur la poi-

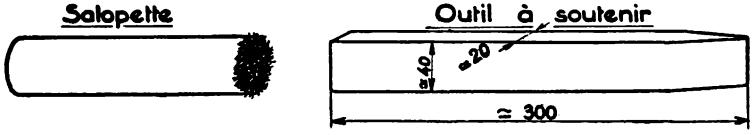



Fig. III-239.

trine une plaque de tôle appelée *cuirasse* pour ne pas être blessé par la pression de l'outil.

Pour le travail au chariot on emploie des molettes de formes variées (fig. III-240). On lubrifie les tôles avec du suif ou avec un mélange suif-huile de ricin. La cire d'abeilles donne d'excellents résultats. Le lubrifiant est étendu avec un chiffon roulé dans un tube (salopette) (fig. III-239).

**Exécution du repoussage.** — ***Centrage.*** — On serre entre le mandrin et le centre, le flan découpé au diamètre calculé. Un ouvrier exercé monte les flans en marche ; mais c'est une opération dangereuse pour un débutant. Avec l'outil à soutenir qui prend appui sur une broche, on centre le flan (fig. III-241). Pour la série, un montage de centrage est indispensable (fig. III-241).

***Mise en forme.*** — Solidement attaché avec la sangle, on prend dans la main gauche l'outil à soutenir et, dans la main droite, le brunissoir. Celui-ci, buté sur la poitrine, agit comme un levier ayant la broche pour point d'appui. On attaque le flan près du fond et on déplace l'outil d'un mouvement régulier vers le bord ; puis on fait une passe en sens inverse, du bord vers le fond (fig. III-234).

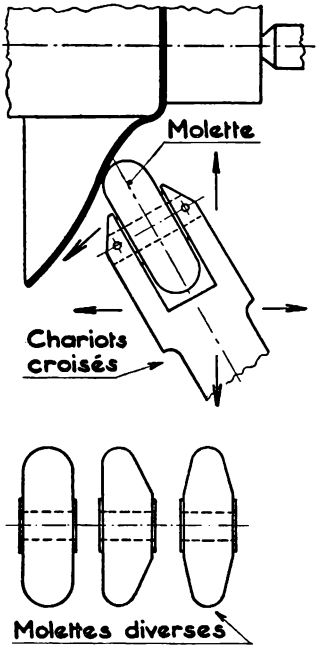



Fig. III-240.
Repoussage à la molette.

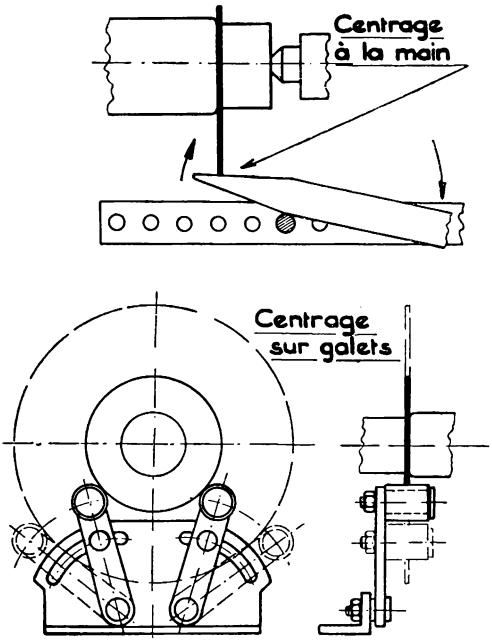



Fig. III-241. — Centrage du flan.

Le déplacement correct exige un glissement de l'outil le long de la broche.

*On doit éviter les formes intermédiaires évasées* qui sont une cause d'amincissement. Il vaut mieux tenir le bord fermé ; ceci est obtenu

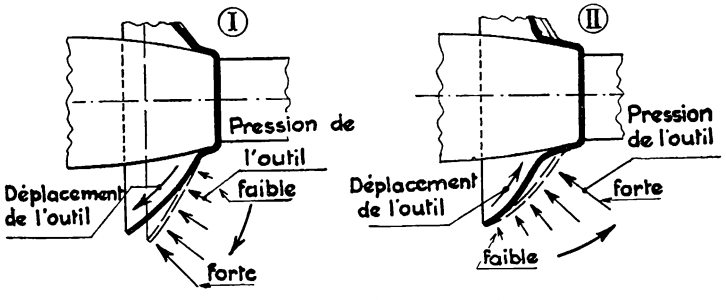



Fig. III-242. — Pression sur les outils.

par une pression progressive de l'outil sur la pièce, faible au départ, modérée au milieu et forte en fin de passe, dans les 2 sens (fig. III-242).

En cours de travail, on fait disparaître le faux rond par rognage. Par passes alternées dans les 2 sens, on couche progressivement le bord sur le mandrin. Souvent, les formes intermédiaires exécutées par des débutants présentent des côtes qui ont pour cause une pression irrégulière (fig. III-243). Cette pression n'est pas de valeur constante comme il vient d'être dit ; mais elle est progressive, et exercée *sans à-coups et sans arrêt* par un mouvement d'avance *très régulier*.

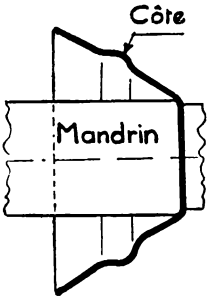


Fig. III-243.

Une pression exagérée du brunissoir sur le bord provoque la formation de plis avec les tôles minces ; on les évite en réduisant la pression sur le bord et en appuyant bien l'outil à soutenir à l'envers de la tôle. Si le graissage n'est pas suffisant, l'outil grippe sur la tôle.

Avec l'aluminium qui se prête au repoussage d'une façon remarquable, on ne recuit pratiquement jamais en cours de travail.

Par contre, le cuivre, le laiton, les duralinox, le duralumin, les aciers, les inoxydables surtout, sont recuits, une ou plusieurs fois, avant la mise en forme définitive et d'autant plus souvent que le métal est plus dur et qu'il s'écrouit plus vite. On travaille les duralinox et le duralumin à chaud.

***Lissage.*** — Lorsque la mise en forme est terminée, on rogne et on procède au lissage qui fait disparaître les rayures laissées par le brunissoir (fig. III-244). Avec la cuillère plate placée sous le bras comme l'indique le croquis I, on commence à lisser avec l'arrondi en allant

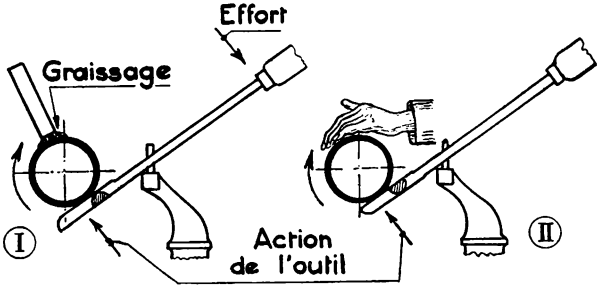


Fig. III-244. — Lissage.

du fond vers le bord. Le déplacement doit être régulier et la pression varie avec l'importance des rayures. Une trop forte pression amincit la tôle sur un mandrin métallique ; pour éviter le grippage, on graisse durant tout le travail en suivant le déplacement de l'outil.

Après une ou plusieurs passes suivant l'état de la surface, on retourne la cuillère et on termine avec le plat en appuyant plus légèrement. L'ouvrier suit l'outil avec les doigts sur la pièce, pour répartir la légère couche de graisse (II). Par un dernier rognage on met la pièce à la longueur définitive.

Le centre est alors enlevé et le fond est lissé à son tour avec le plat de l'outil. On peut améliorer l'aspect de l'objet terminé en passant un chiffon sur lequel on a mis du rouge ou tout autre produit à polir.

***Bordage*** (voir chapitre Bordage, page 289).

***Pièces rétreintes au bord.*** — Cache-pot (fig. III-245). Pour repousser des pièces dont l'ouverture est plus petite que le fond ou le milieu, on utilise des mandrins spéciaux en bois ou en métal, composés de plusieurs pièces assemblées. Après repoussage le mandrin est démonté et les éléments sont sortis les uns après les autres. Ces mandrins sont constitués par plusieurs segments en nombre variable avec les dimensions de la pièce et le diamètre de l'orifice de sortie.

Une pièce centrale ou « fût » (fig. III-245), maintient les segments

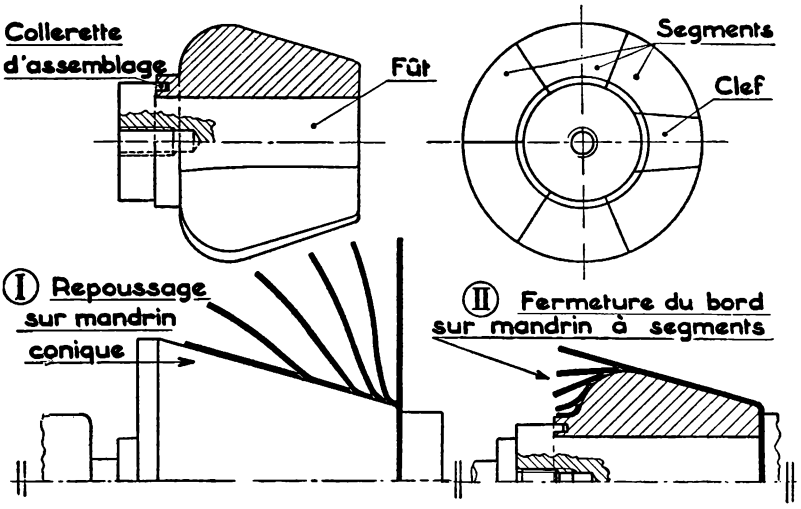



Fig. III-245. — Repoussage sur mandrin démontable.

assemblés par une collerette qui s'ajuste parfaitement dans la gorge des segments. On immobilise l'ensemble par une goupille ou une vis que l'on démonte pour sortir les morceaux du mandrin. Un segment appelé « clef » est coupé suivant une pente inverse des autres pour être dégagé le premier vers l'intérieur.

Pour les pièces de ce genre, à faire en grande série, on combine souvent le travail à la presse et au tour à repousser : on emboutit à la presse les formes cylindriques ou coniques et on termine la mise en forme de l'ouverture au tour sur un mandrin démontable.

**Applications.** — Sur un tour à repousser, avec un outillage simple exécuté rapidement et à peu de frais, on peut exécuter des pièces de formes extrêmement variées que la presse ne permet pas toujours d'obtenir. Mais le calibrage est un peu moins rigoureux surtout sur les mandrins bois ; le rendement est moindre qu'à la presse et il faut une main-d'œuvre spécialisée.

Par repoussage, on ne peut former que les surfaces de révolution (elliptiques quelquefois avec un montage spécial). A la presse, il est possible d'obtenir des formes rectangulaires, oblongues ou quelconques, etc.

# MACHINES AUTOMATIQUES

## EMBOUTISSAGE A LA PRESSE

**Principe.** — *Mise en forme* à partir de métaux en feuilles, de *surfaces non développables*, par *déformations plastiques*, à *froid* le plus souvent, ou à *chaud* (pièces épaisses).

Déformations obtenues sur *presses mécaniques* ou *hydrauliques*, par le déplacement relatif d'un *poinçon* et d'une *matrice*, en une ou plusieurs opérations, appelés *passes*. La 1re passe est exécutée à partir d'une tôle plane, par un *outil de 1er emboutissage* (fig. III-246) ; la « coquille » obtenue est souvent reprise dans des *outils de réétirage* si l'embouti est profond (fig. III-247) ou dans des *outils de conformation* (voir fig. III-260). Pour les tôles minces, la plupart des outils sont équipés de *serre-flan* (voir fig. III-257), sauf pour les formes peu profondes.

On peut comparer, pour une même pièce, les formes intermédiaires, d'une part, à la *presse* (fig. III-248) et, d'autre part, au *tour à repousser* qui sont les mêmes qu'à la main (fig. III-249).

### Presses mécaniques.

Le mouvement du coulisseau est obtenu par un système bielle-manivelle, ou bielle-excentrique. Dans ces presses, *pour le coulisseau*, les espaces parcourus, la vitesse et les efforts *varient avec la position du maneton du vilebrequin.*

Les diagrammes de la figure III-250 montrent que les espaces et la vitesse du coulisseau, qui sont nuls aux points morts, haut et bas, ont une valeur maximale au point *T*. Inversement, les *efforts sur le coulisseau* qui ont une valeur minimale au point *T*, ont une *valeur maximale au point mort bas.*

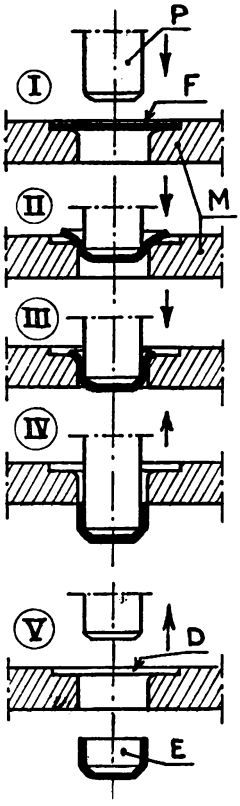



Fig. III-246.
Outil de premier emboutissage sans serre-flan.

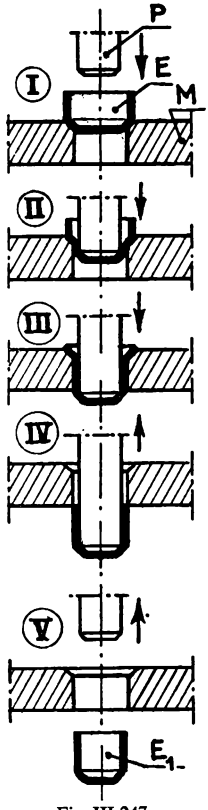



Fig. III-247.
Outil de réétirage sans serre-flan.

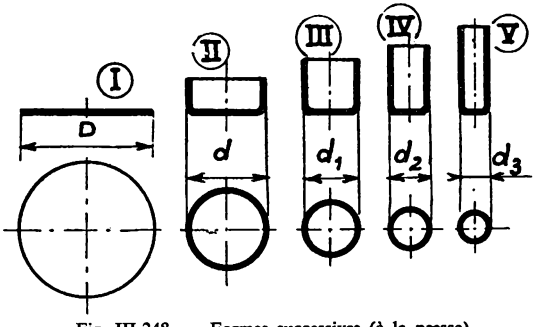



Fig. III-248. — Formes successives (à la presse).

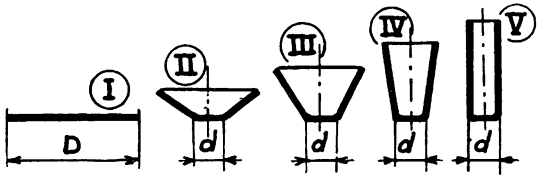



Fig. III-249. — Formes successives (rétreinte à la main ou au tour à repousser).

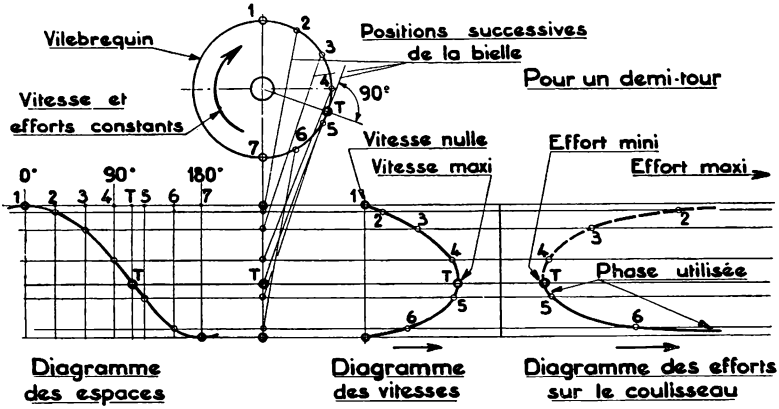



Fig. III-250.

## Classement des presses.

### 1° *D'après le nombre de coulisseaux :*

*Presses simple effet*, ou à un seul coulisseau (fig. III-251) qui peut être commandé par une ou plusieurs bielles et monté sur les différents types de bâtis. Par adjonction d'un dispositif de pression sous le plateau (voir fig. III-256 et III-257), on peut utiliser ces presses en double effet (double effet par le bas).

*Presses double effet* (fig. III-252). — Deux coulisseaux à commande indépendante : le coulisseau extérieur (double effet par le haut), guidé par les glissières du bâti, a un rôle secondaire : serre-flan, découpage, etc., tandis que le coulisseau central, appelé *plongeur*, et qui se déplace à l'intérieur du coulisseau extérieur, est chargé de l'opération principale d'emboutissage.

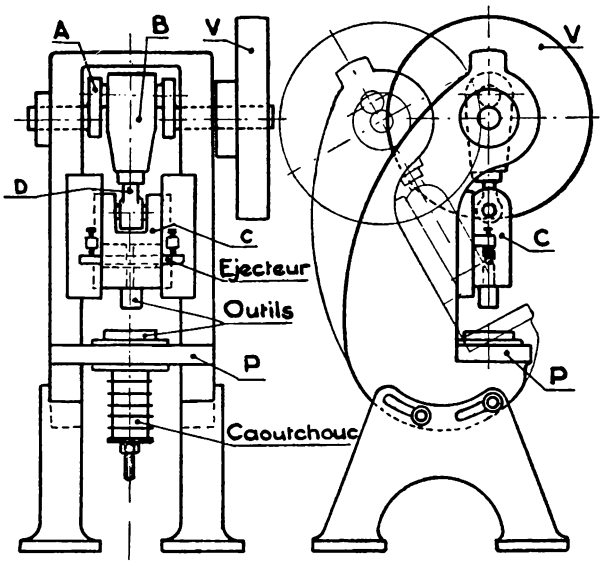



Fig. III-251. — Presse simple effet à col de cygne.

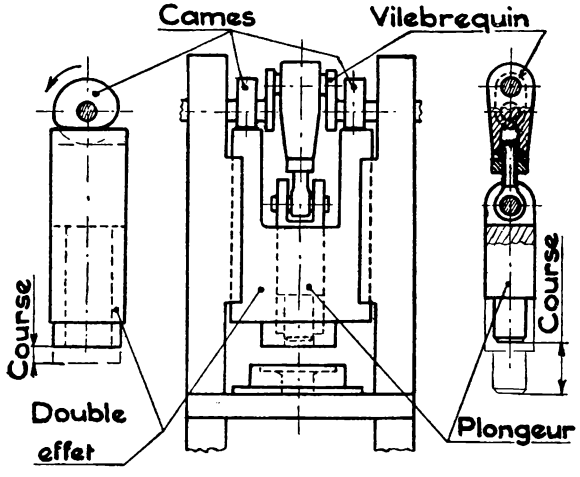



Fig. III-252. — Presse double effet.

Le double effet est commandé par des cames, des genouillères ou balanciers, qui maintiennent le coulisseau extérieur fixe, durant tout le travail du plongeur (fig. III-253 *bis*).

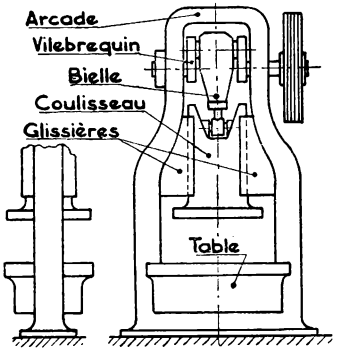



Fig. III-253. — Bâti à arcade.

*Presses triple effet* ou triple action. Presses double effet, complétées par un troisième coulisseau, placé sous le plateau inférieur et travaillant en sens inverse des deux autres (c'est-à-dire de bas en haut). Moins utilisées.

### 2° *D'après la forme des bâtis :*

Les bâtis sont en fonte (petites presses), en acier moulé, et plus souvent, en acier laminé et soudé.

*A col de cygne* (fig. III-251) pour petites pièces, pour simple et double effet, avec une bielle, parfois deux. Souvent le bâti est inclinable par rotation dans un berceau (fig. III-251) ce qui permet l'évacuation des produits finis par gravité.

*A arcade* (fig. III-253) moyenne et grosse puissances pour simple et double effet, avec une bielle et souvent deux.

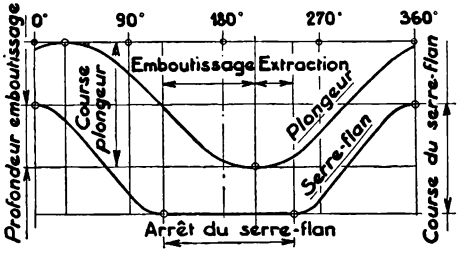



Fig. III-253 *bis*. — Diagramme des espaces (presse double effet).

*A montants.* — Le chapiteau ou plateforme supérieure est relié au plateau inférieur par des montants à l'intérieur desquels sont logés des tirants (fig. III-254). Sur les montants sont placées les glissières du coulisseau extérieur. Il existe de ces presses à simple, double et triple effet. L'ensemble de la presse est exécuté en tôles laminées, découpées et assemblées en caissons nervurés, par soudage à l'arc,

en lignes nettes et sobres, sans mécanisme apparent ; de plus en plus utilisées en moyennes et grosses puissances.

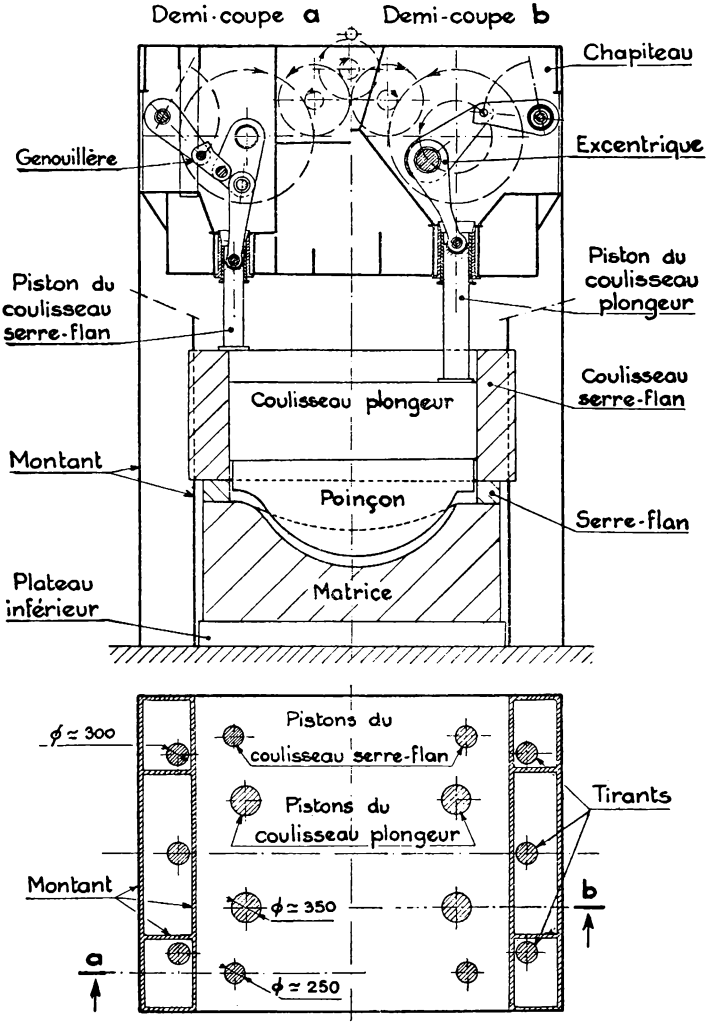



Fig. III-254. — Schéma d'une presse à montants double effet.

**Organes de commande.** — Le *moteur* entraîne un lourd *volant* et cet ensemble tourne sans arrêt pendant le travail.

L'*embrayage* assure, à chaque coup de presse, la liaison mécanique, entre le moteur et l'arbre vilebrequin.

EMBRAYAGE A CLAVETTES. — Liaison obtenue par des clavettes, qui sont déverrouillées en haut de course, pour l'arrêt.

EMBRAYAGE ÉLECTRO-PNEUMATIQUE A DISQUE. — Par le jeu d'une électro-vanne, des disques — solidaires du mécanisme de commande du coulisseau — sont, soit entraînés par le volant (marche) ou, au contraire, rappelés par des ressorts, contre des disques fixes (arrêt).

Lorsque l'on a enclenché un embrayage à clavettes, il n'est plus possible d'arrêter la presse : elle fait un tour complet ; par contre, on peut arrêter le coulisseau en n'importe quel point de sa descente, avec un embrayage électro-pneumatique, ce qui permet les réglages par approches.

**Organes réducteurs.** — Trains d'engrenages qui donnent au coulisseau sa cadence de travail : de 4 à 6 coups à la minute (grosses presses), jusqu'à 80 à 90 coups à la minute (petites presses).

***Course du coulisseau*** réglable dans certaines petites presses.

***Réglage de la hauteur du coulisseau.*** — A l'aide d'un système vis-écrou, placé entre la bielle et le coulisseau (fig. III-252), manœuvré à la main, ou à l'aide d'un petit moteur auxiliaire.

**Éjections.** — ***L'éjection positive*** (du haut vers le bas) a pour rôle d'extraire le produit — ou la bande — de l'outil supérieur. Une barre

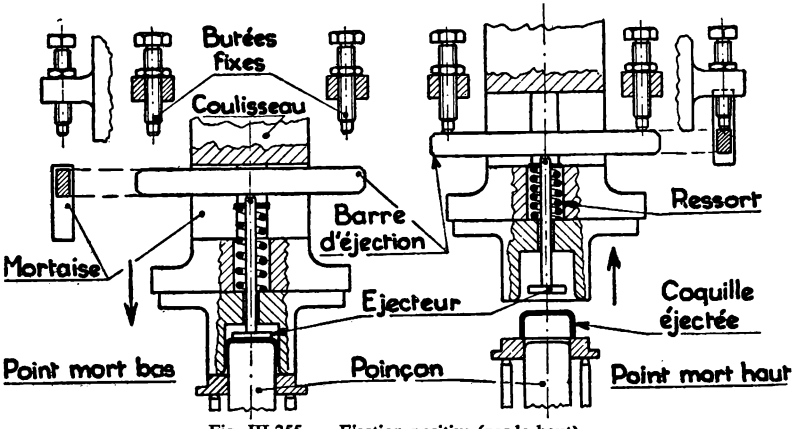



Fig. III-255. — Ejection positive (par le haut).

— ou plusieurs — traverse le coulisseau dans une mortaise (fig. III-255) ; à la remontée du coulisseau, la barre est arrêtée par deux butées réglables, et maintient l'éjecteur fixe, pendant que le coulisseau continue de remonter.

*Éjection négative* (du bas vers le haut). — Ce sont des dispositifs de pression placés sous le plateau que l'on appelle *coussins élastiques* et qui ont un double rôle : *effet supplémentaire par le bas*, et *éjection*

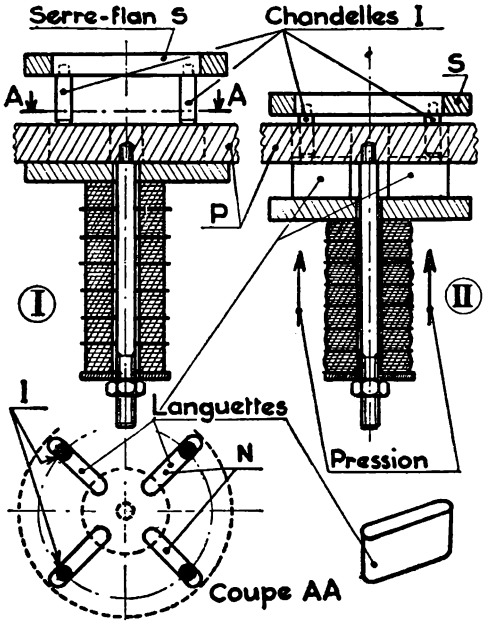



Fig. III-256. — Pression sous le plateau par caoutchouc (éjection négative).

*négative*. Le plateau — ou la table — est percé de quatre trous de forme oblongue, disposés en croix (fig. III-256) et dans lesquels sont ajustés quatre languettes qui transmettent l'effort, poussées par quatre chandelles (petites presses). Dans les gros modèles, les chandelles traversent le plateau percé de trous (fig. III-257).

*Coussins élastiques : ressorts* ou *rondelles Belleville* (peu utilisés)

*Rondelles de caoutchouc* (fig. III-256) séparées par des disques d'acier.

*Coussins pneumatiques* ou *Marquette* (fig. III-257). — Un détendeur permet de faire varier la pression d'air comprimé dans un réservoir qui alimente le coussin pneumatique. Par le réglage de la pression

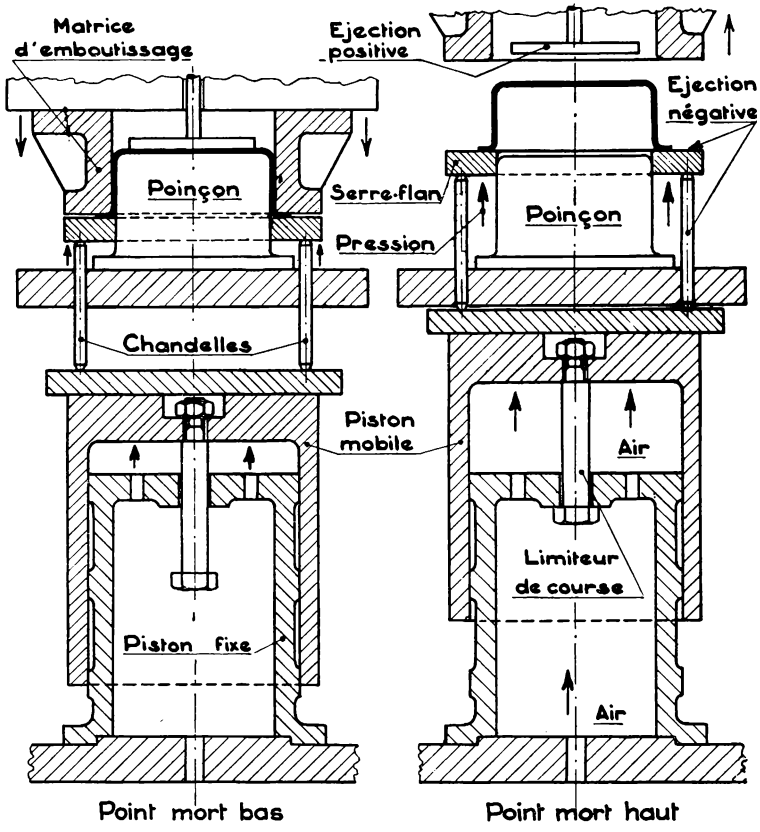



Fig. III-257. — Coussin pneumatique sous le plateau (éjection négative).

d'air, on peut faire varier facilement l'effort exercé par le piston. Ce système a l'avantage de fournir des pressions réglables, constantes et plus élevées que les précédents.

**Outillage complémentaire.** — Systèmes d'alimentation et d'avance automatiques, plateaux revolver, ventouses, soufflettes à air comprimé pour évacuation, etc. En carrosserie automobile, on déve-

loppe de plus en plus « l'automation » qui permet la marche synchronisée de 6 à 8 presses en ligne, avec alimentation des presses par tapis roulants ou transferts, sans intervention manuelle.

**Protection.** — *Protecteurs fixes* ou *mobiles :* ces derniers s'écartent de la presse ou descendent avant le coulisseau. *Bracelets* qui éloignent les mains de l'ouvrier.

***Avec embrayage électro-pneumatique.*** — Éloignement des mains des ouvriers, par l'obligation de manœuvrer simultanément deux interrupteurs, qui commandent la presse ; faisceaux de rayons lumineux aboutissant à une *cellule photo-électrique :* si un rayon est coupé, la presse ne démarre pas ou elle s'arrête.

**Presses hydrauliques** ou plus exactement actionnées par de l'huile sous pression.

Dans ce type de machines on rencontre surtout des presses puissantes aux plateaux de grandes dimensions, mais il en existe de petits et moyens modèles.

Entre un socle $F$ (fig. III-258) et une plate-forme $A$, assemblés par 4 colonnes robustes $C$, sont montés les plateaux porte-outils $P$ et $P_1$. Les colonnes servent de guides aux plateaux. Au-dessus de la plate-forme sont fixés les pompes $Z$, les réservoirs $R$ et la tuyauterie $U$ de circulation d'huile.

A la descente, le plateau porte-poinçon $P$ est commandé par un gros piston central $B$ et à la montée par 2 pistons auxiliaires $r$.

Quatre autres pistons $p$ assurent la descente du plateau presse-flan $P_1$, qui est relevé par le mouvement du plateau porte-outil. La pression du plateau presse-flan s'exerce au travers du plateau porte-outil par 4 colonnes de pression $D$.

Les mouvements sont généralement les suivants :

*a)* Descente rapide du serre-flan $S$, qui maintient une pression constante que l'on peut régler.

*b)* Descente rapide du poinçon jusqu'à l'entrée en contact avec la tôle.

*c)* Descente lente pendant la phase d'emboutissage.

*d)* Remontée rapide du plateau porte-outils qui entraîne le serre-flan dans son ascension.

Les pompes sont capables de débiter l'huile rapidement sous une très forte pression, et on agit sur le débit pour faire varier la vitesse d'emboutissage.

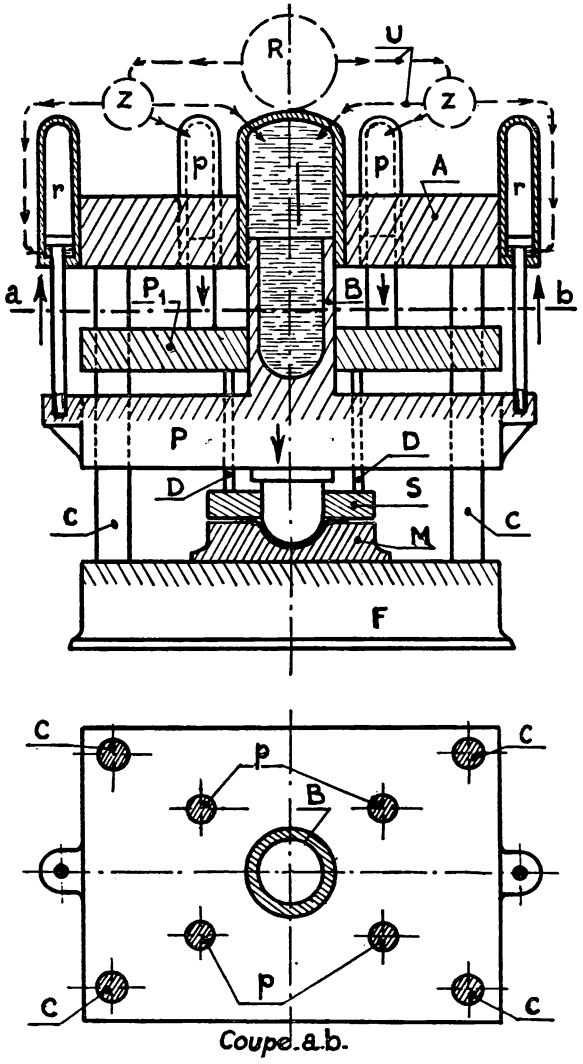



Fig. III-258. — Schéma d'une presse hydraulique.

***Comparaison.*** — Les presses hydrauliques ont l'inconvénient d'être plus fragiles que les presses mécaniques : risques de pannes dans les distributions, les clapets, les joints, les pompes, etc. Ces

risques sont d'ailleurs diminués par l'amélioration de la qualité de la fabrication et des matériaux employés. Elles sont moins rapides dans les cadences élevées, surtout à côté des petites presses mécaniques.

Par contre, elles ont de gros avantages, en ce qui concerne la souplesse de marche : vitesse d'approche rapide, vitesse de travail lente, réglable et *uniforme*, retour rapide.

L'effort est également réglable et il n'y a pas de risques de coincement au point mort bas, pas de déformations ou de cassures du bâti par surcharge accidentelle (effort maxi. limité par la pression de l'huile).

Les réglages sont faciles par approches successives, avec possibilités d'arrêter le coulisseau, en n'importe quel point de la course, à la descente, et à la remontée.

Les presses mécaniques, plus rustiques, restent plus économiques pour les travaux de grandes séries, et surtout pour le découpage.

**Calcul des dimensions des flans et des outils.** — L'épaisseur n'étant pas modifiée, la surface du flan est égale à la surface de la pièce emboutie.

Les dimensions des flans, obtenues par le calcul — qui servent de base aux essais et au contrôle des modifications éventuelles des épaisseurs — sont corrigées par quelques essais. En effet, les résultats obtenus peuvent varier avec la nature et l'état du métal, le jeu entre le poinçon et la matrice, etc.

Il est prudent de prévoir un excès de métal pour le rognage du bord qui s'allonge irrégulièrement suivant sa position par rapport au sens du laminage de la tôle (formation de cornes). Souvent l'outil de découpage du flan est exécuté après mise au point et essais de l'outil d'emboutissage, lorsque ces deux outils ne sont pas combinés.

***Réductions successives de diamètre.*** — Pour pièces de section circulaire exécutées avec serre-flan, en partant d'un flan plat (fig. III-248) :

Diamètre du 1er poinçon = diamètre du flan × 0,6 à 0,5 minimum.
» 2e » = » 1er poinçon × 0,8 à 0,7.
» 3e » = » 2e » × 0,8.
» 4e » = » 3e » × 0,85.
» 5e » = » 4e » × 0,85, etc.

Ces coefficients sont des moyennes et peuvent varier avec la nature l'état et l'épaisseur du métal, l'outillage utilisé, etc.

***Traitements.*** — L'emboutissage impose au métal des déformations très importantes, qui l'écrouissent plus ou moins rapidement suivant sa nature.

Pour redonner au métal un allongement suffisant qui lui permette de supporter — sans cassures — de nouvelles déformations, on le recuit.

Pour les aciers, le cuivre, le laiton, il faut un recuit après 2 ou 3 opérations.

L'aluminium s'écrouit lentement et on le recuit peu. Par contre, les duralinox (A-G3 — A-G5) et le duralumin (A-U4G) surtout exigent des recuits fréquents.

Les allongements pour-cent très élevés des aciers inoxydables leur permettent de se prêter aux emboutissages profonds, mais ils exigent de très gros efforts, et il faut recuire à chaque opération.

On peut signaler dans l'emboutissage des grandes surfaces en tôle d'acier un « brisage » exécuté sur des machines spéciales.

La tôle est entraînée par les rouleaux *ABCD* (fig. III-259). Le rouleau briseur *E* est relevé, dès que la tôle est engagée et lui impose la déformation figurée sur le croquis. Une série de rouleaux dresseurs remet la tôle à plat.

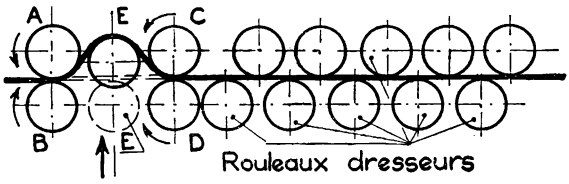



Fig. III-259.

Ce traitement qui doit être exécuté quelques heures avant l'emboutissage a pour but d'éviter la « vermiculure », sorte de marbrure qui altère la surface des tôles.

Pour tous les métaux et alliages, un décapage après recuit (sauf pour le recuit en blanc) élimine l'oxyde et prolonge la durée des outils.

***Outils d'emboutissage.*** — *Qualité des outils.* — Les outils sont en fonte ou en aciers au carbone ou indéformable.

Pour la plupart des travaux d'emboutissage, une finition soignée, un polissage et même un chromage facilitent le glissement du métal, diminuent le pourcentage de pièces rebutées et améliorent l'aspect du produit fini.

Pour les *petites séries* en alliages légers, on fait des outils en bois comprimé, en zinc, en duralumin moulé (chutes de tôle coulées) et en matières plastiques. Ces derniers sont fabriqués rapidement par moulage avec des résines synthétiques. On ajoute à celles-ci de la silice ou du talc, puis un catalyseur qui provoque le durcissement dans les 24 ou 48 heures. On peut avec ces outils faire un minimum de 200 à 300 pièces en travaillant sur matelas de caoutchouc ou avec le jeu poinçon-matrice.

*Lubrification.* — Les frottements élevés des tôles contre les outils et les serre-flans exigent une lubrification des surfaces en contact. On emploie l'huile soluble, les huiles de coupe, le suif, la vaseline, la paraffine, seuls ou en mélange, les graisses graphitées pour les travaux délicats. Généralement on graisse les flans ou les bandes avant de les passer sous la presse.

*Le jeu.* — Entre poinçon et matrice, on ménage, en plus de l'épaisseur de la tôle, un jeu variable avec l'opération.

On conseille un jeu égal aux 2/10 de l'épaisseur, ajouté au diamètre, pour les outils de premier emboutissage, 3/10 à 4/10 de l'épaisseur pour les passes suivantes. Pour les passes de finition ou de calibrage on supprime le jeu.

*Évents.* — Dans la plupart des outils, il est nécessaire de prévoir des trous pour l'évacuation de l'air.

## Différents types d'outils.

***Outils classés par type d'opération*** (fig. III-260) :

1° *Outils de 1er emboutissage* transforment une surface plane (flan) en une surface non développable (II).

2° *Outils de réétirage* approfondissent la forme d'une pièce déjà emboutie (III et IV).

3° *Outils de conformation* agissent plus localement : avivage d'une arête par réduction des rayons où des arrondis, exécution d'un détail, d'un relief, etc. (IV et V).

4° *Outils de finition* qui ne sont pas des outils d'emboutissage : bordage (voir fig. V-21 et V-22), agrafage, détourage (fig. III-260, VI et fig. III-276), poinçonnage, etc.

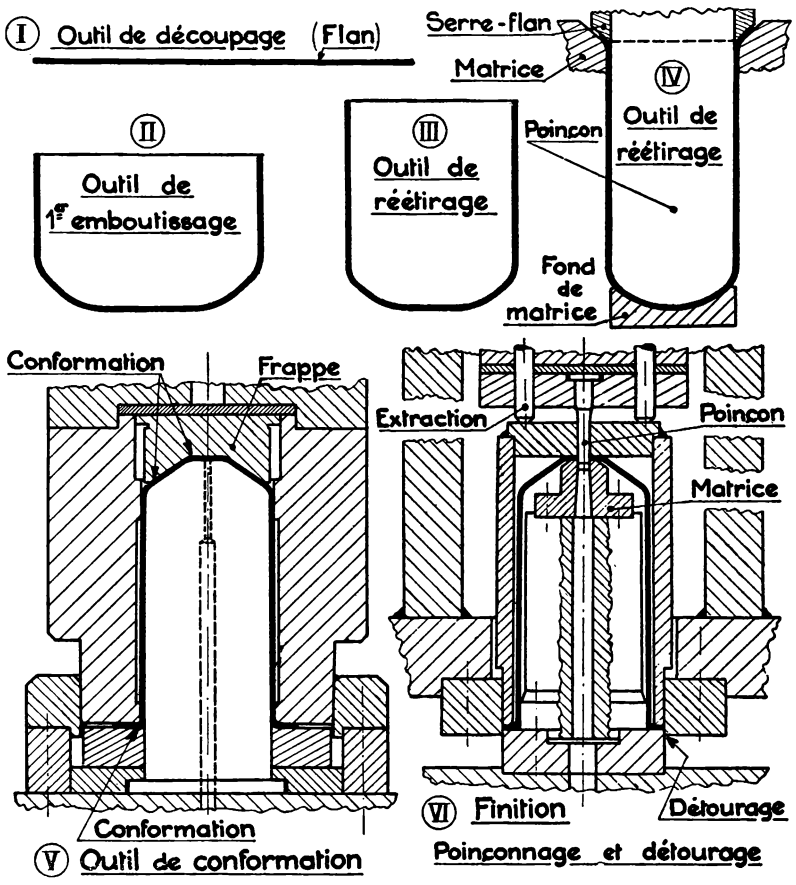



Fig. III-260. — Série d'outils d'emboutissage.

### *Outils classés par la nature des déformations :*

1° *Outils travaillant en totalité par étirage.* — Déformations au milieu d'une tôle de grandes dimensions, dont les bords sont trop larges pour permettre le glissement du métal (fig. III-261) ; la surface augmente au détriment de l'épaisseur.

2° *Outils travaillant en totalité par rétreinte.* — Dans tous les cas, le fond est plan (fig. III-262 et III-270) et de surface suffisante pour supporter la pression du poinçon. Le bord peut être cylindrique, conique, ovale, prismatique, etc.

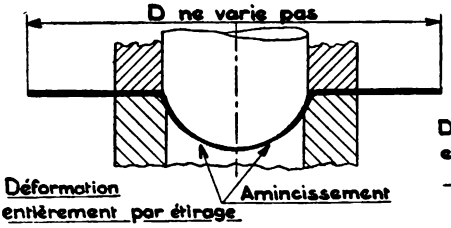



Fig. III-261. — Outil d'étirage.

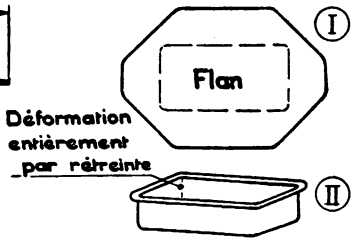



Fig. III-262. — Pièce rétreinte.

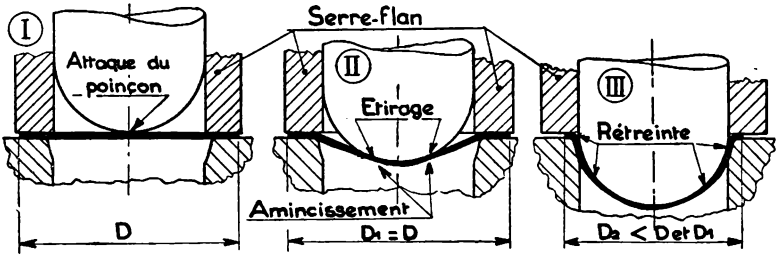



Fig. III-263. — Étirage et rétreinte.

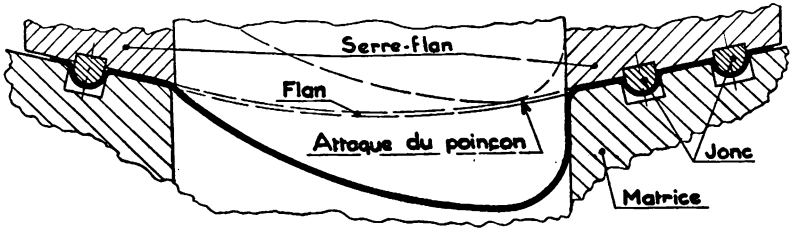



Fig. III-264. — Joncs de freinage.

3° *Outils travaillant en partie par étirage et en partie par rétreinte* (fig. III-263). — Le flan est calculé pour permettre la rétreinte des bords. A l'attaque du poinçon (I) l'effort est faible (formes sphériques ou similaires) et insuffisant pour rétreindre les bords: le milieu s'amincit légèrement (II). Lorsque l'effort atteint une valeur suffisante, le bord se contracte (rétreinte en III) : $D_2 < D$ et $D_1$.

Dans ce type d'outillage, on peut faire varier à volonté le rapport étirage-rétreinte :

— en faisant *varier la pression sur le serre-flan* (le taux d'étirage augmente avec la pression) ;

— en faisant varier la *largeur du bord* qui reste sous le serre-flan (le taux d'étirage augmente avec la largeur du bord) ;

— en ajoutant sur les portées du serre-flan, des *joncs de freinage* (fig. III-264) ; on dispose une ou plusieurs rangées de joncs, sur tout le pourtour ou par places (fig. III-265). Utilisé pour la mise au point des outillages, pour répartir uniformément le taux de travail et éviter la formation de plis ou de déchirures.

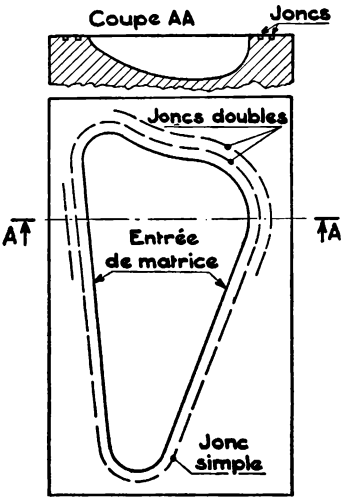



Fig. III-265. — Disposition des joncs.

## Outils travaillant par rétreinte.

***Outils de premier emboutissage.*** — *Outil simple pour presse simple effet.* — Le flan *F* découpé à l'avance et lubrifié est placé dans un logement *D* (drageoir), ménagé dans la matrice *M* (fig. III-246).

Par son passage dans la matrice, le poinçon *P* impose à la tôle les déformations indiquées par les croquis II, III et IV. A la montée du coulisseau la « coquille *E* » est décollée par l'arête inférieure de la matrice (IV et V), et tombe sous la machine où elle est recueillie.

Les angles d'attaque des outils ne sont jamais vifs. Lorsque la coquille n'est pas réétirée on se contente d'un arrondi dont le rayon varie de 6 à 10 *e*. Les matrices ont parfois une entrée conique (fig. III-267). Pendant l'emboutissage il se forme des plis qui sont rétreints par l'action du rayon de la matrice.

Ces outils ne peuvent convenir que pour les faibles réductions de diamètre et les fortes épaisseurs ; pour un même diamètre le coefficient de réduction diminue avec l'épaisseur, et inversement.

Lorsque le bord est relativement large, par rapport à l'épaisseur, les plis trop profonds (culottes, voir fig. III-176) se replient en donnant naissance à des amorces de cassures et même à des cassures. Il faut alors utiliser un serre-flan.

*Outils combinés de découpage et d'emboutissage avec serre-flan.* — POUR PRESSE DOUBLE EFFET. — Le métal est préparé en bandes dont la largeur est légèrement supérieure au diamètre du flan.

Le coulisseau double effet porte un outil *S* (fig. III-266) qui attaque le premier en découpant le flan par son profil extérieur *A* (II). Puis, le piston plongeur intervient, et exécute l'opération d'emboutissage (III et IV).

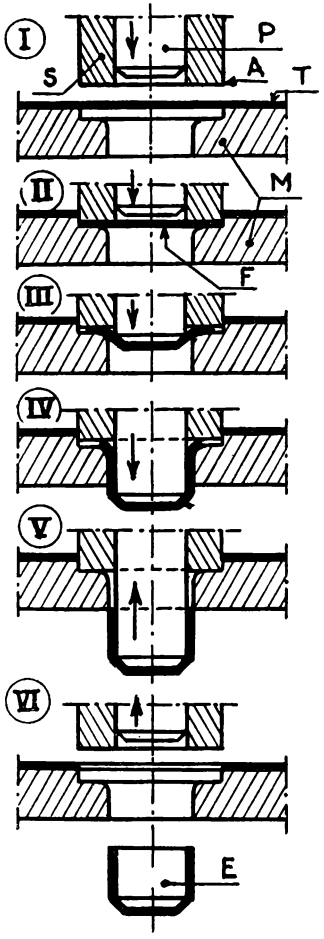



Fig. III-266.

Durant toute la descente du piston plongeur *P*, le presse-flan *S*, après avoir découpé, maintient sa pression sur le flan, pour s'opposer à la formation de plis.

La coquille *E* est décollée comme dans l'outil précédent (V et VI). Lorsque l'embouti a un bord plat (fig. III-268), il faut un éjecteur sous le plateau pour chasser la coquille par-dessus. Dans ce cas on incline le bâti pour que le produit fini tombe vers l'arrière sans intervention de l'ouvrier.

Le poinçon porte un chanfrein de 30° à 45° avec des arrondis dont

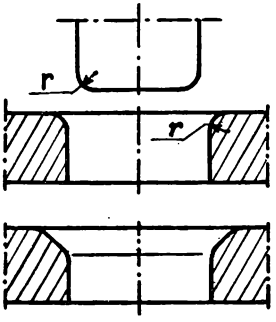



Fig. III-267.

le rayon = 4 à 5 *e* (fig. III-269). *Le diamètre $d_1$ du plat du poinçon est égal au diamètre du poinçon suivant.* L'arête supérieure de la matrice peut présenter un arrondi comme celui de l'outil précédent ($r = 6$ à 10 *e*) ou un chanfrein analogue à celui du poinçon (fig. III-272).

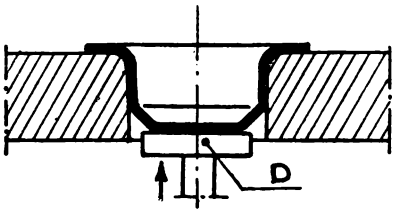



Fig. III-268.

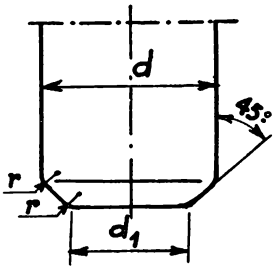



Fig. III-269.

POUR PRESSE SIMPLE EFFET. — La position des outils est inversée (fig. III-270) : le poinçon sur le plateau (fixe) et la matrice sur le coulisseau (mobile).

L'outil supérieur joue le rôle de poinçon de découpage par son arête extérieure (II) et de matrice d'emboutissage par son alésage intérieur (III et IV).

La matrice de découpage dépasse légèrement le poinçon d'emboutissage qui est situé au centre. En descendant, l'outil supérieur découpe le flan, et poursuivant son action, forme la coquille. Soutenu par les « chandelles », le serre-flan accompagne la matrice d'emboutissage durant toute sa descente.

A la montée, la coquille reste dans la matrice d'où elle est chassée par l'éjecteur qui bute sur la barre transversale (fig. III-255).

Avec un bâti incliné le produit fini tombe de lui-même vers l'arrière.

***Outils de réétirage.*** — *Outil simple pour presse simple effet.* — La coquille formée par l'outil de premier emboutissage est passée dans un outil dont le rôle est de réduire le diamètre.

Sur les croquis de la figure III-247, on voit les différentes phases du réétirage. Comme dans l'exemple de la figure III-246, l'éjection se fait sous la table.

Ce genre d'outil ne peut convenir que pour les faibles réductions de diamètre, et le pourcentage de réduction diminue avec l'épaisseur de la tôle.

*Outils de réétirage avec serre-flan.* — POUR PRESSE DOUBLE EFFET. — Le serre-flan actionné par le double effet (fig. III-271) a les dimensions exactes du poinçon qui a servi à l'opération précédente (II).

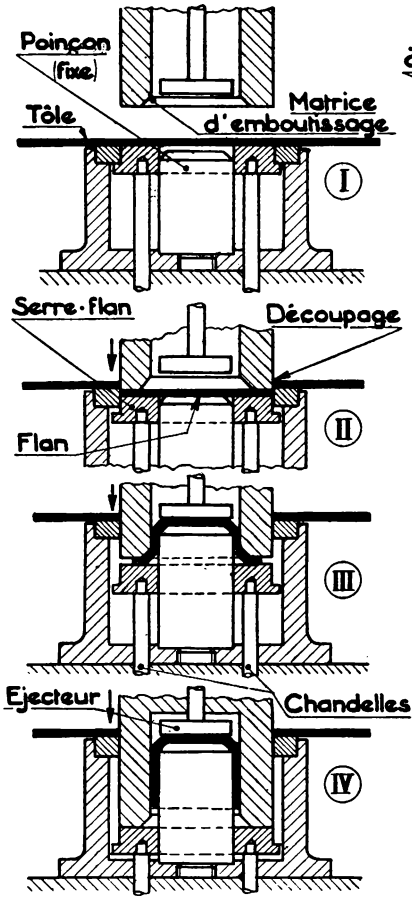



Fig. III-270. — Outil de 1er emboutissage pour presse simple effet.

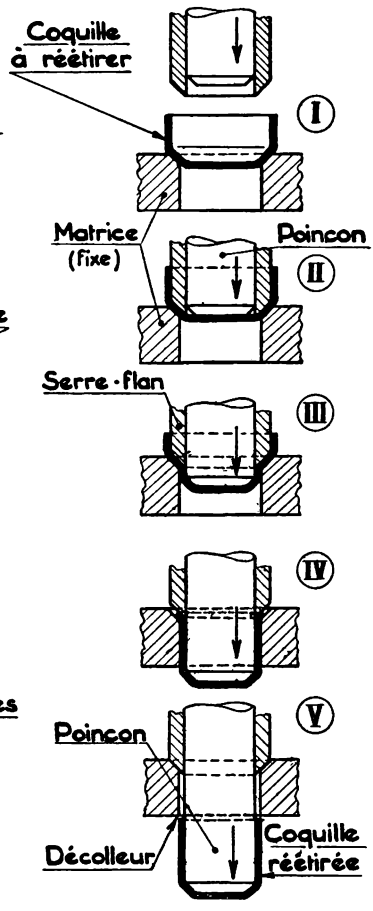



Fig. III-271. — Réétirage sur presse double effet.

*Sa face d'appui doit être ajustée parfaitement sur celle de la matrice* (chanfrein de 30 à 45°, rayons de 4 à 5 *e*).

L'extrémité du poinçon présente le même chanfrein ; la surface plane a le même diamètre que celui du poinçon suivant.

Le serre-flan presse la coquille sur le chanfrein de la matrice (fig. III-271), durant toute la descente du piston plongeur qui opère la réduction de diamètre (III et IV). L'éjection se fait géné-

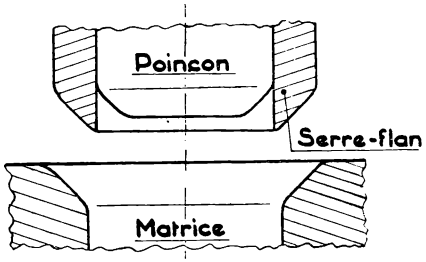



Fig. III-272. — Chanfreins et arrondis sur outils de réétirage.

ralement sous le plateau. Si la coquille a une collerette, il faut un éjecteur dessous (fig. III-268).

POUR PRESSE SIMPLE EFFET. — Dans ce type d'outil, le poinçon reste fixe (fig. III-273). La matrice est montée sur le coulisseau et le serre-flan qui entoure le poinçon accompagne la matrice durant tout le réétirage (II et III). L'éjection se fait comme figure III-270.

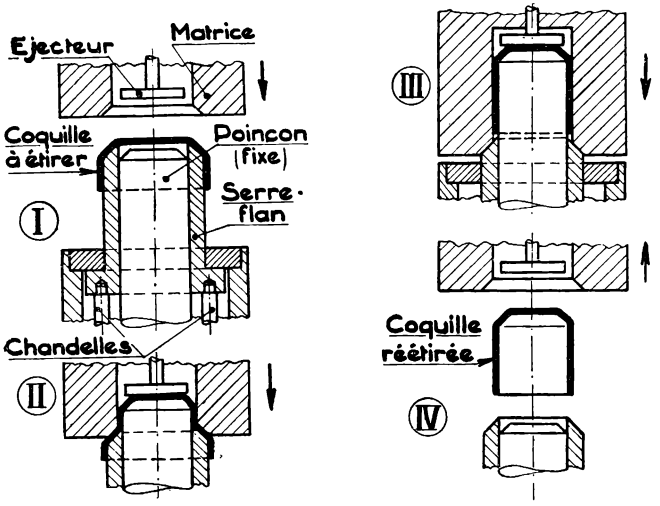



Fig. III-273. — Réétirage sur presse simple effet.

***Pièces de forme hémisphérique sur presse simple effet.*** — On retrouve les mêmes principes que dans les outils précédents.

Les croquis de la figure III-274 donnent un exemple d'outil pour presse à simple effet.

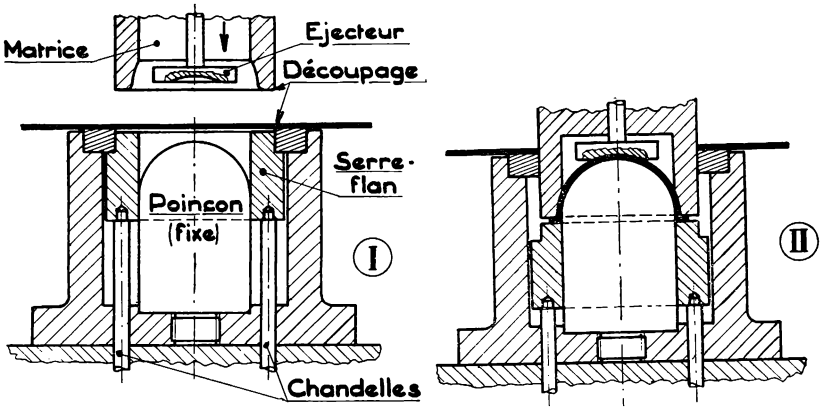



Fig. III-274. — Emboutissage sphérique.

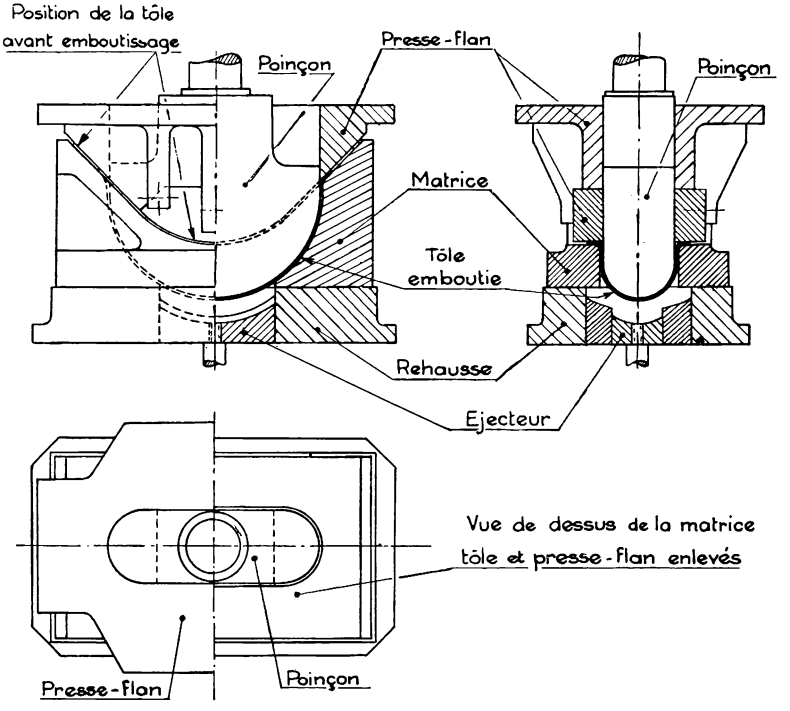



Fig. III-275. — Outil d'emboutissage type carrosserie.

**Outil non cylindrique pour presse double effet.** — L'ensemble schématisé sur la figure III-275 est du type des outils utilisés en carrosserie. Comme les précédents, il est constitué d'un poinçon, d'une matrice et d'un serre-flan.

On peut observer que la surface d'appui du serre-flan n'est pas plane ; dans cet outil, elle est cylindrique et dans tous les cas elle doit être rigoureusement développable.

En fin d'emboutissage, il reste sous le serre-flan une bande de tôle qui est détourée ensuite dans un outil de reprise et l'éjection se fait par un dispositif sous le plateau inférieur (voir fig. III-256 et III-257).

**Outil de détourage à cames** (fig. III-276). — Le mouvement vertical du coulisseau est transformé en mouvement horizontal, ce qui permet de couper sur des bords relevés.

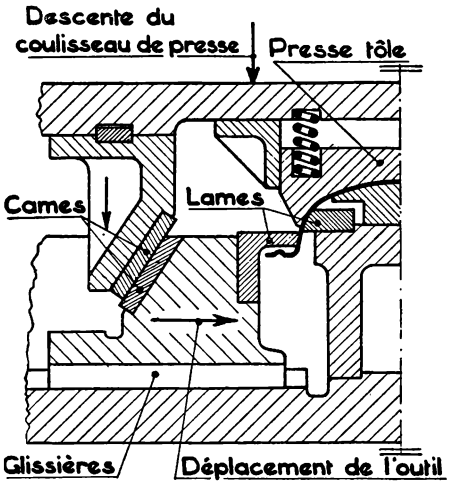



Fig. III-276. — Outil de détourage.

**Mise en forme à l'aide d'explosifs.** — *Principe.* — On utilise l'onde de choc d'une explosion pour obliger une feuille de métal à épouser la forme d'une matrice dans laquelle on a fait le vide (fig. III-277). Cette onde de choc peut également être produite par la décharge d'une puissante batterie de condensateurs. La pression est transmise par de l'air, du caoutchouc ou plus généralement par de l'eau et le procédé, coûteux, s'applique aux métaux spéciaux durs qui ne peuvent pas subir de traitement d'adoucissement ou qui s'écrouissent vite.

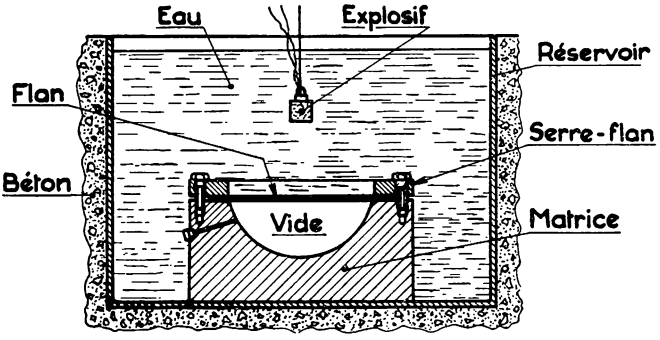



Fig. III-277. — Emboutissage à l'aide d'explosifs.

**Filage à la presse.** — *Principe.* — A partir d'un flan épais et de faible diamètre (palet) de volume égal au produit final, on exécute *très rapidement* (en une seule passe) des emboutis très profonds sans recuits intermédiaires.

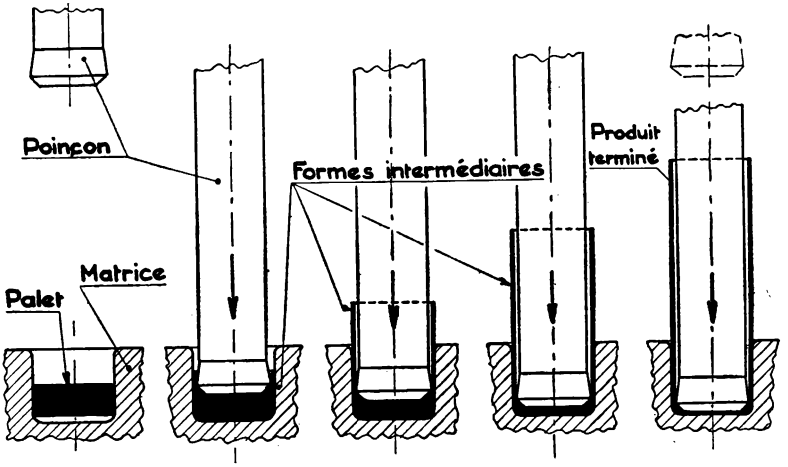



Fig. III-278. — Filage à la presse.

Un poinçon de grande longueur et commandé par une presse à genouillère (action très rapide) écrase le palet dans une matrice peu profonde (fig. III-278). Le jeu entre le poinçon et la matrice donne l'épaisseur de la surface latérale de la coquille.

On explique ces remarquables possibilités de déformation par le fait que le métal est soumis d'une part, à une pression considérable, et d'autre part à une température élevée. Dans ces conditions particulières, il ne se comporte plus alors comme à la température ambiante.

On peut signaler comme application courante la fabrication des tubes en aluminium pour pâtes diverses : crèmes, pâtes dentifrices, etc.

**Fluotournage.** — C'est un procédé de mise en forme qui s'apparente à *l'extrusion* (voir fig. I-7), par la nature des déformations, et au *repoussage au tour*, par l'outillage utilisé (mais avec réduction importante de l'épaisseur).

Les produits de départ sont soit des flans plans épais, soit des ébauches épaisses, préparées par emboutissage ou par forgeage.

L'ébauche est entraînée en rotation par un mandrin et la réduction d'épaisseur est obtenue par l'action d'une molette (fig. III-279). Souvent, une molette de soutien est opposée diamétralement à la molette de travail, pour équilibrer les efforts.

Le mandrin peut être conique (fig. III-279), cylindrique (fig. III-280),

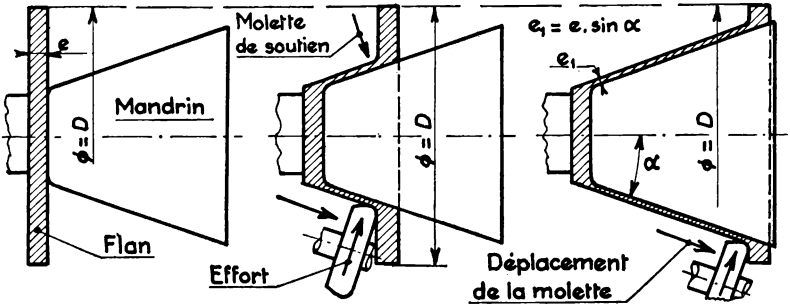



Fig. III-279. — Fluotournage conique

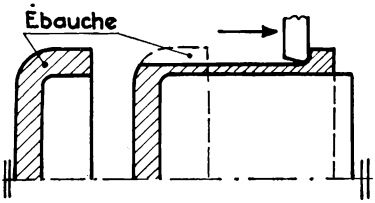



Fig. III-280.

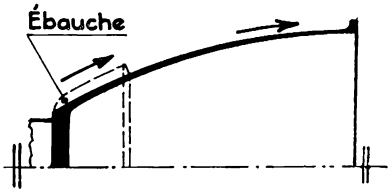



Fig. III-281.

ou à génératrice courbe (fig. III-281). Dans tous les cas, il faut des machines puissantes, avec lubrification et refroidissement des molettes.

Par fluotournage, on exécute des pièces de petites et de grandes dimensions (⌀ 2 m, longueur 3 m et plus) surtout en aéronautique. On obtient des pièces sans soudure, qui remplacent avantageusement les pièces usinées (pas de pertes par copeaux).

CHAPITRE IV

# LES PROCÉDÉS D'ASSEMBLAGE

## RIVETAGE

Le rivetage est un procédé d'assemblage en régression devant les divers procédés de soudage, mais qui conserve, néanmoins, un domaine d'application important : charpente métallique, pièces que le soudage déformerait ou recuirait, rivetage des métaux et alliages ayant une mauvaise soudabilité (duralumin, tôles protégées, etc.).

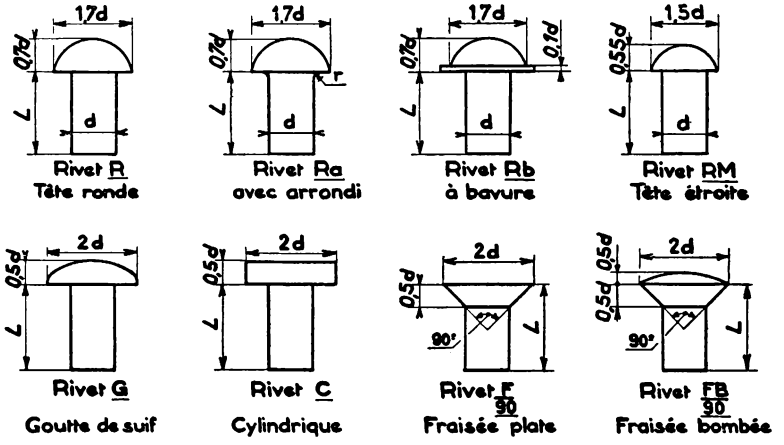



Fig. IV-1. — Formes des têtes de rivets.

### RIVETAGE DES ACIERS NON ALLIÉS

Les rivets sont en acier de classe A, à faible teneur en carbone, et de bonne qualité pour la pose à froid ; dans ce dernier cas, ils sont livrés recuits.

***Désignation des rivets.*** — Rivet R.6.12 veut dire : rivet à tête ronde dont la tige a 6 mm de diamètre ($d$) et 12 mm de longueur ($L$).

La longueur $L$ de tous les rivets est mesurée sous la tête, sauf pour les rivets tête fraisée qui sont mesurés tête comprise.

***Rivures.*** — La partie du rivet, opposée à la tête, est formée par écrasement et prend les formes ronde, fraisée, ou fraisée bombée, avec des dimensions au plus égales à celles des têtes de formes correspondantes.

**Proportions d'une ligne de rivure en fonction de l'épaisseur à river** (fig. IV-2 et tableau IV-3).

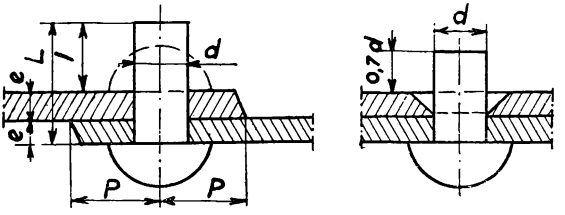



Fig. IV-2.

TABLEAU IV-3

*Proportions d'une ligne de rivure (acier).*

| Épaisseur de chaque tôle ($e$) | 0,8 | 1 | 1,5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Diamètre des rivets pour $2e$ : $d$ | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 8 | 10 | 12 | 16 | 20 | 22 | 22 | 24 | 26 |
| Largeur des pinces : P | 8 | 10 | 11 | 12 | 14 | 15 | 16 | 20 | 25 | 30 | 33 | 34 | 36 | 40 |
| Longueur de tige pour une rivure ronde $l$ | 3,5 | 5 | 6 | 7,5 | 10 | 10 | 15 | 18 | 24 | 30 | 33 | 33 | 36 | 39 |

Longueur de tige cylindrique pour former une rivure ronde $l = 1{,}2\ d$ pour petits diamètres rivés à froid ; $l = 1{,}5\ d$ pour gros rivets à chaud. Pour une rivure fraisée normale $l = 0{,}7\ d$.

Cette longueur de tige est augmentée de 1 mm par épaisseur de tôle en plus de 2 épaisseurs (tôles moyennes et épaisses).

***Écartement des rivets*** ou *pas* des rivures.

| | |
|---|---|
| Pour rivures sans fatigue . . . . . | jusqu'à 20 $d$ |
| Rivures d'assemblages non étanches. . . . | 5 à 6 $d$ |
| Rivures étanches à l'eau sans pression . . . | 3,5 à 4 $d$ |
| Pour pression jusqu'à 6 bar . . . . . | 3 $d$ |
| Pour hautes pressions ou liquides très fluides . | 2,5 à 2,25 $d$ (min.) |

***Jeu dans les trous.*** — Le jeu est toujours *aussi faible que possible.* Lorsque les 2 tôles sont percées ensemble après montage un jeu de 0,1 à 0,2 mm est suffisant pour les petits rivets jusqu'à 4 mm de diamètre. On perce avec 0,5 mm de jeu environ jusqu'à 8 mm de diamètre. A partir de 10 mm (rivets posés à chaud) le jeu peut atteindre 1 à 1,5 mm pour les gros rivets posés à chaud dans des trous poinçonnés.

**Chanfreinage.** — Le chanfreinage a pour but de préparer le matage qui est destiné à rendre les rivures étanches. Ce n'est qu'à partir de 5 à 6 mm d'épaisseur que les tôles sont chanfreinées et matées. Angle du chanfrein : 20° environ (fig. IV-4).

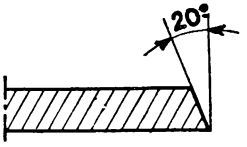


Fig. IV-4.

***Outillage.*** — Voir chanfreinage page 78.

**Montage.** — Tout ensemble rivé est, au préalable, assemblé par des boulons.

***Outillage.*** — On utilise des boulons sous lesquels on place des rondelles pour réduire au minimum le temps nécessaire au montage. Dans les constructions aéronautiques, on monte les tôles avec des agrafes dites « Éclair », qui se manœuvrent avec des pinces spéciales, sans exiger l'accès sur la face opposée de la tôle.

***Pratique du montage.*** — Si la tôle est poinçonnée, il vaut mieux mettre le tracé à l'intérieur et river sur la face opposée au tracé.

On ne met pas les premiers boulons dans n'importe quels trous. On s'assure que les deux pièces à assembler sont bien dans leurs positions respectives correctes et on choisit les trous qui coïncident parfaitement, en commençant au milieu, en règle générale.

On met des boulons tous les 3 ou 4 trous pour les rivures étanches. Pour les travaux moins soignés on peut les écarter de 8 à 10 trous. En principe, on ne serre aucun boulon avant de les avoir mis tous en place.

**Rivetage proprement dit.** — Jusqu'à 10 mm de diamètre on rive à froid (rivets recuits). Au-dessus de 10 mm les rivets sont posés à chaud.

***Outillage pour rivetage à la main.*** — On utilise des marteaux à garnir à main, des marteaux à frapper devant, des chasse-rivets plats ou fraisés (fig. IV-6) pour les petits diamètres, des bouterolles à main ou entenaillées. Sur les machines, on emploie des bouterolles prolongées par un cylindre (voir fig. IV-8). Pour rivures à chaud : $R = 0{,}8$ à $0{,}9$ $d$ (fig. IV-5).

Les rivets à tête cylindrique ou fraisée sont soutenus pendant le rivetage par des tas à surface plane. Ces outils sont remplacés par des tas à empreinte pour les rivets tête ronde ou goutte de suif. L'empreinte est moins profonde que la tête du rivet (fig. IV-5). On utilise beaucoup les tas à queue qui s'adaptent dans un marbre ou à l'extré-

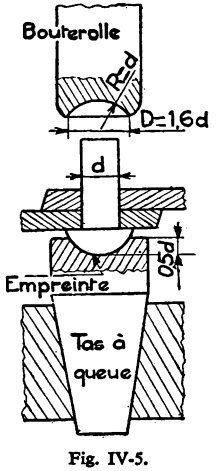



Fig. IV-5.

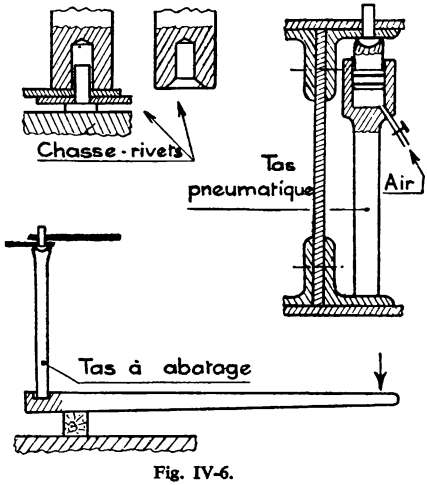



Fig. IV-6.

mité d'une barre à river. Sous les pièces lourdes, on place des tas à abatage (fig. IV-6) ; à l'inertie du tas, s'ajoute la pression exercée par l'aide-riveur.

Dans un corps fermé (cylindre, caisson) de dimensions moyennes on peut employer le tas à abatage, le tas à vis et le tas pneumatique (fig. IV-6). A l'intérieur des pièces de grandes dimensions le rivetage sur parois verticales oblige à utiliser des tas libres, soutenus par des palans mobiles : masse du tas au moins égale à 4 à 5 fois la masse du marteau.

Les gros rivets en acier sont chauffés à des températures qui peuvent atteindre 1 100-1 200 °C, sur des machines à chauffer par résistance (fig. IV-7) : un transformateur *T*, logé dans le bâti, alimente les bornes de chauffage en courant alternatif monophasé de faible tension et de haute intensité. Le rivet, traversé par ce courant, est chauffé rapidement à la température convenable ; il existe des machines à 2, 3, 4 et 6 têtes.

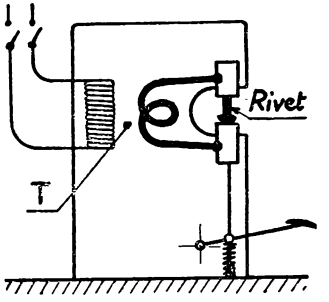



Fig. IV-7. — Principe d'une machine électrique par résistance.

***Outillage pour rivetage à la machine.*** — *Machines pneumatiques à choc.* — Ces outils sont actionnés par de l'air comprimé à une pression de 5 à 7 bar.

Sur une bouterolle *a* (fig. IV-8) vient frapper le marteau *b* qui se déplace dans le cylindre *d*. Une valve de distribution *c* envoie l'air comprimé alternativement d'un côté et de l'autre du marteau. Suivant les constructeurs, cette valve est commandée par le mouvement

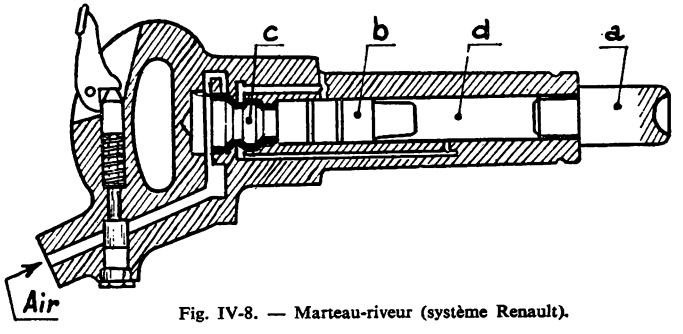



Fig. IV-8. — Marteau-riveur (système Renault).

du marteau qui, dans sa course, découvre ou ferme des orifices reliés à la valve ; ou bien le déplacement du marteau crée une dépression ou une compression qui agit sur la valve.

*Machines pneumatiques à pression.* — POUR PETITS RIVETS. — La bouterolle est montée en bout d'un piston sur lequel agit l'air comprimé. Le bâti à col de cygne porte d'un côté le cylindre et la bouterolle et de l'autre côté le tas à empreinte.

POUR GROS RIVETS. — L'air actionne un gros piston de course relativement grande. Ce piston commande le déplacement de la bouterolle par l'intermédiaire d'un jeu de leviers et d'une genouillère qui diminuent la course en augmentant l'effort.

*Machines dites hydrauliques.* — L'huile sous pression, débitée par une pompe, agit sur le piston portant la bouterolle mobile. Le bâti à col de cygne est articulé (fig. IV-9), et suspendu à un appareil de levage ; la pompe peut être sur la machine ou séparée.

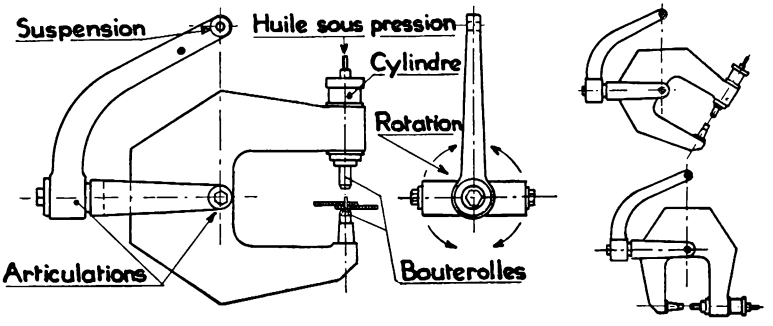



Fig. IV-9. — Schéma d'une machine à river à pression.

Les *marteaux pneumatiques*, très bruyants, sont très maniables et peuvent river en n'importe quel point d'un grand ensemble. Les *machines à pression* sont silencieuses et elles serrent énergiquement les tôles ; elles ne peuvent river que sur les bords (col de cygne) et sont moins maniables.

***Pratique du rivetage.*** — *A la main.* — Avant d'écraser le rivet on fait porter la tête de celui-ci sur la tôle à l'aide du chasse-rivet ou « tire-rivet » ou encore « appelle-rivet » (fig. IV-6), ou pour les gros diamètres, en donnant quelques coups de marteau autour du rivet.

L'écrasement est obtenu avec le minimum de coups de marteau bien appuyés et donnés d'aplomb, puis on pince la rivure avec l'arête de la bouterolle (fig. IV-10).

Un rivet bien fait doit présenter sur tout le tour de la rivure une légère bavure qui assure l'étanchéité en évitant l'entaille marquée par l'arête de la bouterolle.

Les rivures fraisées sont écrasées uniquement au marteau.

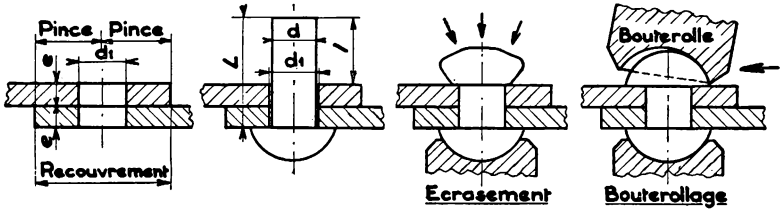



Fig. IV-10. — Exécution d'un rivetage à la main.

*A la machine.* — Le marteau-riveur doit être tenu bien d'aplomb pour ne pas coucher le rivet. Pour les rivets posés à chaud, par admission progressive de l'air, on obtient un martelage de valeur croissante : faible au début, dans la phase d'écrasement de la tige, puis fort, pour le serrage qui doit être exécuté rapidement.

A la machine à pression, le travail ne présente aucune difficulté, à part le réglage du serrage dans les machines hydrauliques.

**Matage.** — Après rivetage des tôles épaisses chanfreinées — au-dessus de 6 mm — on fait coller les bords des pinces et le bord des têtes de rivets et des rivures par le matage, quand on veut obtenir une étanchéité parfaite.

On utilise des matoirs de formes variées (fig. IV-11).

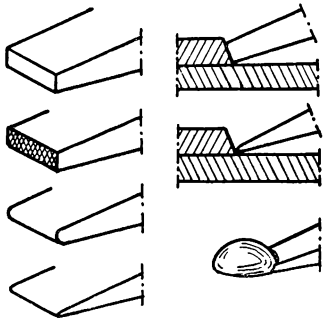


Fig. IV-11. — Matoirs divers.

## RIVURES SPÉCIALES

**Rivures abreuvées ou « embrévées ».** — Lorsqu'on ne veut pas de saillie sur les tôles, on utilise des têtes ou des rivures fraisées. Mais les tôles minces ne permettent pas un fraisage suffisant pour

loger la tête ou la rivure. On procède alors par déformation de la tôle, ce qui ne diminue pas la résistance de celle-ci.

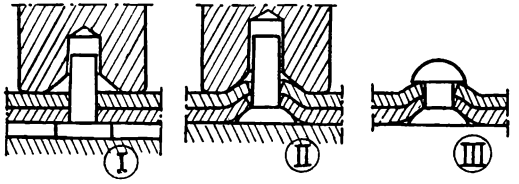



Fig. IV-12. — Rivure abreuvée dans 2 tôles minces.

Avec un chasse-rivet fraisé on emboutit les 2 tôles ensemble (fig. IV-12), pour ne pas avoir de saillie du côté de la tête.

Si on doit river une tôle épaisse sur une tôle mince, il n'est pas possible de déformer la tôle épaisse : dans ce cas, on fraise celle-ci sur la face qui porte sur la tôle mince (fig. IV-13). L'action du chasse-rivet emboutit la tôle mince dans la fraisure.

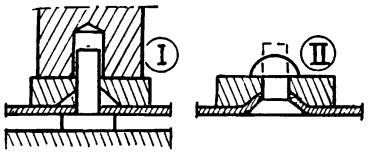



Fig. IV-13. — Rivure abreuvée (tôle mince sur tôle épaisse).

Les rivets sont à tête fraisée, plate, quelquefois goutte de suif.

**Rivures affleurées.** — Ces rivures sont employées pour les alliages légers surtout, afin d'obtenir une surface lisse du côté du rivetage lorsqu'on ne peut pas frapper du côté opposé (fig. IV-14).

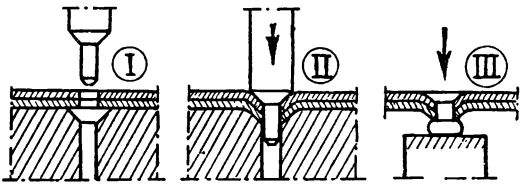



Fig. IV-14. — Rivure affleurée.

Les 2 tôles sont embouties séparément ou ensemble, à l'avance, avec un poinçon dans une forme (II). Le poinçon peut être monté sur une petite presse ou tenu à la main (travail au marteau).

On écrase la rivure dans la fraisure ainsi obtenue ou plus souvent on loge un rivet à tête fraisée dans l'embouti de la tôle et on rive en frappant sur la tête. La rivure est formée par le tas qui est quadrillé pour éviter le glissement et améliorer l'écrasement (III).

## RIVETAGE DES MÉTAUX NON FERREUX

La majeure partie de ce qui vient d'être dit pour les aciers est valable pour les métaux non ferreux, surtout en tôles moyennes et épaisses.

En principe, on rive chaque métal ou alliage avec des rivets de même nature. *Cette règle est particulièrement stricte pour les alliages légers.* Dans un milieu humide le contact de métaux ou alliages de nature différente peut former pile (couple électrolytique) qui corrode la tôle ou le rivet.

**Rivetage du cuivre.** — Si on compare à l'acier, le diamètre des rivets est plus faible et la largeur des pinces est plus grande.

Pour le rivetage des tôles minces on utilise surtout les rivures abreuvées avec des rivets à tête goutte de suif. A l'aide d'un chasse-rivet fraisé on abreuve la tête qui prend la forme fraisée (fig. IV-15). Après rivetage on fait coller la pince intérieure avec un matoir arrondi.

Si la rivure doit être parfaitement étanche, on étame les pinces avant rivetage et on soude à l'étain, l'ensemble terminé.

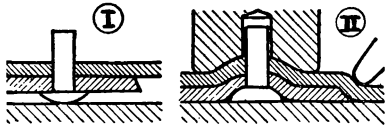


Fig. IV-15. — Rivure abreuvée sur cuivre.

Les rivures sont remplacées de plus en plus par le soudo-brasage et le soudage au chalumeau et à l'argon. Ces procédés ont l'inconvénient de recuire la tôle et, lorsqu'il n'est pas possible d'écrouir après soudage, il est souvent préférable de river.

**Rivetage des alliages légers.** — Le rivetage est peu utilisé pour l'aluminium et pour les duralinox que l'on assemble plutôt par soudage au chalumeau et à l'argon. Par contre, les alliages à traitement

thermique (duralumin) qui présentent après soudage des caractéristiques mécaniques très faibles, sont presque toujours rivés.

Les formes courantes des têtes de rivets sont les mêmes que pour les aciers. Dans les constructions aéronautiques on emploie les rivets à tête tronconique ou à tête cylindrique épaisse (fig. IV-16) pour les rivures étanches.

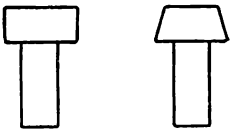


Fig. IV-16. — Rivets spéciaux en duralumin.

Voici d'après les documents publiés par le *Centre technique de l'Aluminium*, les diamètres des rivets pour les tôles de 0,8 mm à 10 mm.

Écartement des rivets ou pas : $p = 3{,}5\ d$ environ, 3 $d$ (min.), 20 $d$ (max.).

| Épaisseur de chaque tôle. | 0,8 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Diamètre des rivets. . . | 2,5 | 2,5 à 3,2 | 3,2 | 4 | 4 | 5 | 6,4 | 8 | 10 | 12,5 | 16 |

Largeur des pinces : $P = 1{,}5\ d + 10$ mm, à 5 $d$ (max.), 2 $d$ (min.).

Écartement des lignes de rivets (double rivure) : $E = 0{,}866\ p$ pour que les rivets soient au même écartement dans tous les sens.

Longueur de tige pour former une rivure ronde : $l = 1{,}5$ à $1{,}75\ d$.

Les rivets en alliages légers sont bien calibrés et le jeu dans les trous est plus faible que pour l'acier : 0,1 mm à 0,3 mm.

Les trous sont généralement percés dans l'ensemble, monté par quelques boulons (gros diamètres) ou par des agrafes ou épingles.

On pose les rivets en aluminium à l'état écroui demi-dur. Par contre, les rivets en duralinox, exécutés à froid jusqu'à 10 mm de diamètre, sont recuits. C'est sur trempe fraîche que l'on pose les rivets en duralumin ; 2 heures après la trempe les rivets non utilisés deviennent trop durs et sont retrempés. Au-dessus de 12 mm de diamètre, les rivets sont posés à chaud : duralinox et duralumin à 400-450 °C maximum.

A la main, le rivetage est exécuté comme pour l'acier. Toutefois, il convient d'utiliser un marteau plus lourd surtout pour le duralumin, et les arêtes de la bouterolle ne doivent pas marquer la tôle sous peine d'amorcer des criques.

Les machines à river sont à percussion ou à pression. Dans la caté-

gorie des marteaux-riveurs (à percussion) il existe des marteaux multi-frappe, qui sont du même type que ceux étudiés pour l'acier, mais plus légers. Souvent, on frappe sur la tête du rivet, et c'est le tas qui écrase la tige, pour former la rivure (voir fig. IV-14). Pour le duralumin, on utilise plutôt les marteaux mono-frappe qui donnent coup par coup un choc plus puissant qui refoule mieux l'ensemble de la tige du rivet.

Dans les machines à pression, l'air comprimé ou une combinaison oléo ou hydro-pneumatique exerce une pression sur un piston qui commande le serrage de la bouterolle.

Comme toutes les riveuses de ce genre, elles peuvent être fixes ou mobiles. Dans ce dernier cas, elles sont suspendues à un palan pour travailler dans tous les plans.

De petites presses portatives à col de cygne réduit, permettent le rivetage sur les bords des pièces de grandes dimensions, sans les déplacer.

***Rivets spéciaux.*** — Lorsque la tôle n'est accessible que d'un seul côté, on utilise des rivets tubulaires. Le type « Chobert » (fig. IV-17)

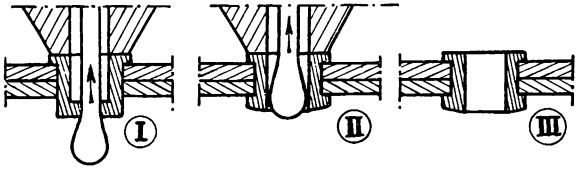



Fig. IV-17. — Pose d'un rivet « Chobert ».

a l'inconvénient de laisser subsister le trou central, ce qui n'est pas toujours acceptable. Dans les rivets genre « Pop » (fig. IV-17 *bis*), la rupture de la tige obture le trou, ce qui augmente la résistance au cisaillement.

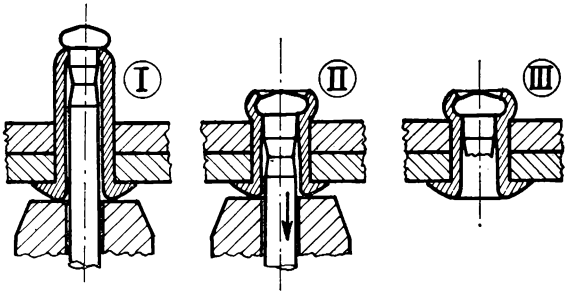



Fig. IV-17 *bis*. — Rivet « Pop ».

***Rivetage des aciers inoxydables.*** — Les tôles d'acier inoxydable peuvent se river comme les aciers non alliés, mais avec des rivets en inoxydable.

A froid, on recommande de limiter l'écrouissage au minimum.

A chaud, les rivets sont chauffés entre 1 050 et 1 200 °C et on évite leur oxydation qui peut être cause de corrosions ultérieures.

Les riveuses à pression sont préférables à tous points de vue.

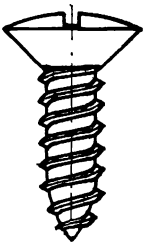


Fig. IV-18.
Vis Parker.

**Vis Parker.** — On peut ajouter l'assemblage par vissage à l'aide de vis « Parker », utilisées pour les tôles minces (1,2 mm maxi.). Ces vis sont en acier dur traité et elles jouent le rôle de taraud, en formant les filets, au cours du vissage, dans un avant-trou percé au ∅ du noyau de la vis. Un cône d'entrée facilite la prise des filets (fig. IV-18). Les têtes sont plates, fraisées, fraisées bombées, ou goutte de suif et le ∅ varie de 2,84 mm à 4,85 mm. Elles peuvent supporter le démontage et le remontage.

# AGRAFAGE

L'agrafage qui n'est applicable qu'aux tôles minces (1,2 à 1,5 mm maximum) est, comme le rivetage, remplacé de plus en plus par le soudage au chalumeau et par résistance. Largeur de l'agrafe $L$ égale 5 à 6 fois l'épaisseur de la tôle.

**Agrafage à la main.** — ***Agrafes droites.*** — Une agrafe ordinaire se présente comme l'indique la figure IV-19. Pratiquement, on ajoute à chaque bord, une bande de tôle dont la largeur est égale à 1,5 fois la largeur de l'agrafe terminée (On peut porter une largeur d'agrafe sur un bord et 2 largeurs sur l'autre bord). La ligne de pliage est tracée à une distance du bord égale à la largeur de l'agrafe, moins l'épaisseur : $L - e$.

Les 2 plis préparés — à la main, ou mieux à la plieuse — sont présentés, puis serrés avec un chasse-agrafe de largeur (fig. IV-19). Lorsqu'on ne veut pas de surépaisseur sur la face accessible on utilise un tas portant une rainure qui joue, à l'intérieur, le rôle de chasse-agrafe (fig. IV-20).

Il est très important de préparer les plis bien droits. Un bord allongé au pliage donne un pli cintré qui ne peut pas être serré ; le pli est coupé par l'outil dans les bouts et il en est de même si le bord est plié trop large (fig. IV-21).

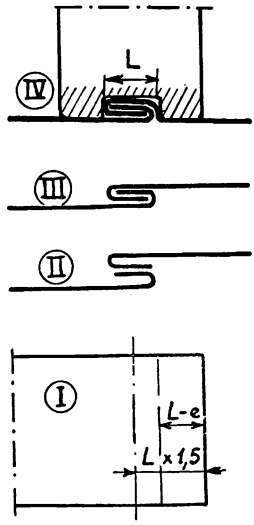



Fig. IV-19. — Phases d'exécution d'une agrafe droite.

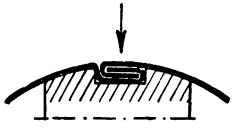


Fig. IV-20. — Agrafe affleurée.

Fig. IV-21. — Agrafe trop large coupée par l'outil.

Les bords parfaitement dressés sont sertis à chaque extrémité avant de passer le chasse-agrafe sur toute la longueur. Un serrage au marteau à coup portant assure l'étanchéité.

***Agrafes circulaires.*** — Pour agrafer 2 viroles on prépare les bords comme figure IV-22. Après montage des 2 extrémités on rabat le bord (III). Cette solution, pour être étanche, doit être complétée par un soudage à l'étain. Dans certains cas, on rabat l'agrafe ainsi exécutée sur le cylindre lorsqu'il est possible de passer un tas à l'intérieur (IV).

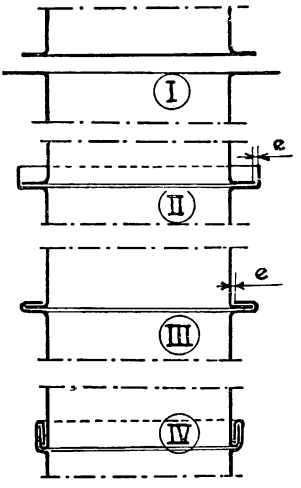



Fig. IV-22. — Agrafages de 2 viroles.

*Agrafage d'un fond sur une virole.* — On étire un petit bord sur la virole et on rétreint un bord de même largeur sur le fond (fig. IV-23). Un jeu, au moins égal à l'épaisseur, doit être ménagé entre les 2 pièces (I). Pour rendre étanche ce type d'agrafe il faut souder à l'étain, ou bien rabattre l'ensemble sur la virole. On commence ce travail (fig. IV-24) sur une tranche à border (I), puis on serre sur un tas de forme (II). Cette même disposition peut être adoptée sur un fond à bord rétreint (fig. IV-25) et on opère comme s'il s'agissait de 2 viroles (fig. IV-22).

**Agrafage à la machine.** — ***Agrafes droites*** (fig. IV-26). — Après une préparation à la plieuse (I), le travail du chasse-agrafe est remplacé

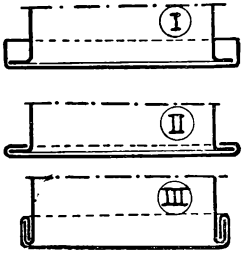



Fig. IV-23. — Agrafage d'un fond sur une virole.

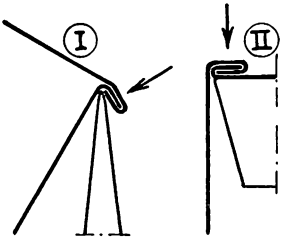



Fig. IV-24. — Agrafe de fond rabattue et serrée.

par l'action d'un galet qui, en roulant, sertit et serre l'agrafe sur toute sa longueur (II).

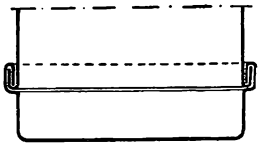


Fig. IV-25. — Agrafage d'un fond à bord rétreint sur une virole.

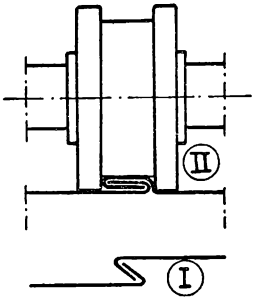



Fig. IV-26. — Serrage d'une agrafe, au galet.

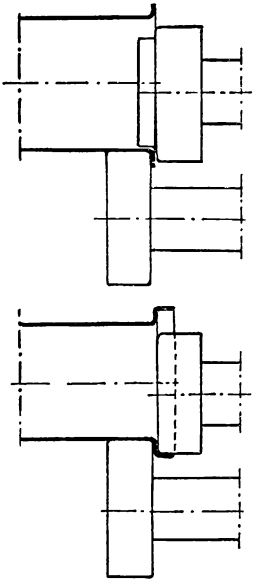


Fig. IV-27. — Préparation des bords à la molette.

Sur une presse à plier, on peut préparer et sertir parfaitement des agrafes de grande longueur (fig. IV-28) et il existe pour les travaux

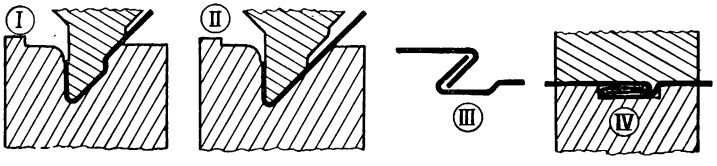



Fig. IV-28 — Outils pour agrafage à la presse-plieuse.

de série des machines automatiques qui agrafent des viroles de faible longueur (seaux, arrosoirs, etc.), en quelques secondes, sans préparation des bords.

***Agrafes circulaires.*** — A défaut de machines spéciales, une moulureuse peut préparer les agrafes avec des molettes de forme appropriée (fig. IV-27).

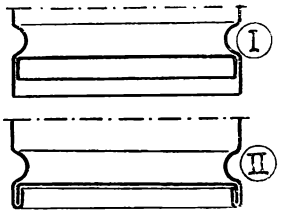



Fig. IV-29. — Agrafage d'un fond sur une virole, avec moulure d'arrêt.

Pour l'agrafage d'un fond on fait, sur la virole, une moulure d'arrêt sur laquelle vient buter le fond (fig. IV-29). Le bord de la virole est ensuite rabattu sur le fond (non étanche).

Avec les molettes de la figure IV-30, on peut sertir une agrafe circulaire, et on peut serrer une agrafe de fond avec les molettes de la figure IV-31.

Mais les véritables machine de série sont les sertisseuses utilisées pour la fermeture des boîtes de conserves. La boîte est montée sur un plateau animé d'un mouvement de rotation et les bords sont sertis par la pression progressive de galets qui roulent et serrent les 2 bords ensemble.

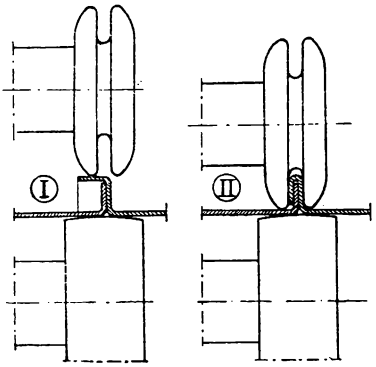



Fig. IV-30.

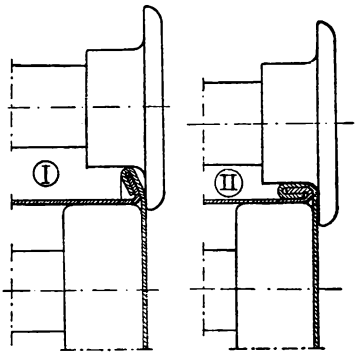



Fig. IV-31.

**Applications.** — L'agrafage est un procédé d'assemblage rapide qui a des avantages dans certains cas : pièces risquant d'être déformées ou recuites par le soudage, objets et ustensiles en tôles étamées et galvanisées qui ne peuvent pas être soudés au chalumeau ou électriquement, fabrications de série (agrafage mécanique). On préfère l'agrafage au rivetage pour les lignes d'assemblages étanches sur tôles minces.

# LES SOUDAGES

## DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE SOUDAGE.

On peut classer les différents procédés de soudage en trois catégories principales (voir fig. IV-32, IV-33, et tableau, page 230).

1° Les *soudages par fusion* avec ou sans apport de métal. *Dans tous les cas*, il faut *protéger le bain de fusion du contact de l'air*, pour éviter l'oxydation ou la nitruration du métal.

2° *Les soudages par chauffage et pression.* — Les pièces sont *chauffées*, puis fortement *comprimées* pour assurer la liaison ; il y a fusion dans une zone très limitée.

Les soudages de ces deux catégories sont aussi appelés *soudages autogènes* (on devrait dire homogènes).

3° *Soudages par interposition d'un alliage de liaison porté à fusion* (soudages hétérogènes) (1). Accrochage superficiel, décapage et fluxage indispensables.

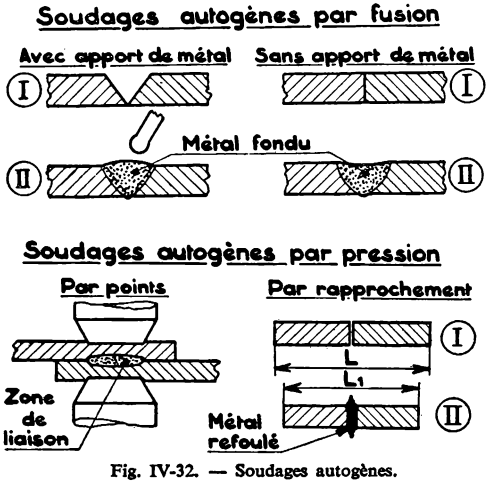



Fig. IV-32. — Soudages autogènes.

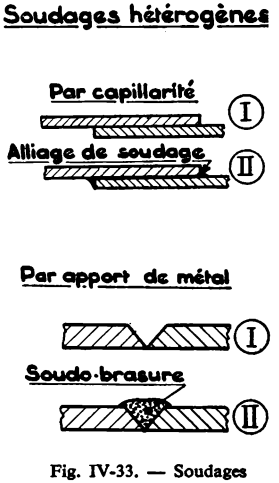



Fig. IV-33. — Soudages hétérogènes.

(1) On fait parfois des soudages hétérogènes par fusion. Ex : acier inoxydable sur acier non allié, ou faiblement allié.

## TABLEAU DES PRINCIPAUX PROCÉDÉS DE SOUDAGE

| Catégorie | Procédé | Source calorifique | Types de soudages | Protection |
|---|---|---|---|---|
| *Par fusion* | *Aux gaz* (autogènes) | Flammes | Chalumeau oxy-acétylénique<br>Chalumeaux divers | Panache réducteur de la flamme |
| | *Soudages à l'arc* (autogènes) | *Arc électrique* | A l'électrode enrobée | Enrobages |
| | | | Sous flux gazeux | Argon, $CO_2$, mélanges |
| | | | Sous flux, électro-conducteur | Flux en grains |
| | | | Sous laitier | Laitier en fusion |
| Par chauffage et pression | *Soudages par résistance* (autogènes) | *Effet Joule* | Soudages par recouvrement { Par points / A la molette / Par bossages | |
| | | | par rapprochement { Par chauffage direct / Par étincelage | |
| Par interposition d'un alliage de liaison | *Soudages hétérogènes* | Flammes, fours | Soudage à l'étain | Protection par flux |
| | | *d°* et induction | Brasages | *d°* |
| | | Chalumeau oxy-acétylénique | Soudo-brasage | *d°* |

## SOUDAGE AU CHALUMEAU

La liaison est obtenue par fusion des bords des pièces à réunir sans apport de métal ou avec apport de métal de même nature que la pièce à souder (ou de nature très voisine).

La chaleur nécessaire à la fusion des différents métaux et alliages est fournie par une flamme produite par la combustion de l'acétylène en présence d'oxygène (flamme oxy-acétylénique).

Le bain de fusion est protégé par une zone réductrice de la flamme (fig. IV-34) dans laquelle sont brûlés de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone.

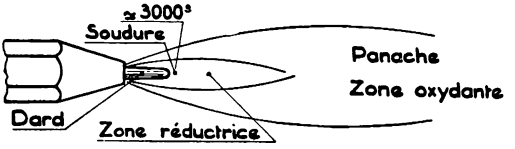



Fig. IV-34. — Flamme oxy-acétylénique.

**Gaz utilisés.** — *Oxygène.* — L'oxygène est comprimé à 150 bar (1) dans des tubes en acier qui en contiennent 5 m³ et, plus couramment, 7 m³ (ramené à la pression atmosphérique). Sur le raccord de la bouteille, on visse un mano-détendeur dont le rôle est de débiter l'oxygène à une pression constante, de l'ordre de 1 bar.

Cette pression est réglable par la manœuvre d'une vis qui agit sur l'obturateur. Deux manomètres indiquent, l'un, la pression dans la bouteille, et l'autre, la pression de détente.

Pour prévenir les accidents, il faut manipuler les bouteilles avec précaution et surtout éviter les chocs et les chutes. Une exposition prolongée au soleil ou auprès d'un four peut augmenter dangereusement la pression intérieure. D'autre part, il ne faut jamais graisser les robinets ou appareils contenant de l'oxygène sous pression.

Les mano-détendeurs sont fragiles et doivent être manœuvrés avec soin. En particulier, il faut protéger l'olive qui fait joint dans le raccord en dévissant l'écrou, *et ne jamais ouvrir la bouteille sans avoir desserré la vis de détente à fond.*

(1) 1 bar = 1 hpz ≈ 1,02 kgf/cm² (voir p. XVII).

*Acétylène.* — L'acétylène est fabriqué par la réaction de l'eau sur le carbure de calcium, sur place (générateurs), mais surtout en usine (bouteilles d'acétylène dissous).

*Acétylène dissous.* — On ne peut pas comprimer l'acétylène comme l'oxygène sans danger d'explosion spontanée. On dissout l'acétylène dans l'acétone ; les bouteilles sont remplies complètement d'une matière poreuse qui fractionne le gaz par ses petites alvéoles et s'oppose à la propagation d'une explosion éventuelle. Les bouteilles courantes contiennent 4 $m^3$ d'acétylène (ramené à la pression atmosphérique). Pression maximale : 15 bar.

Avec un mano-détendeur comparable à celui des tubes d'oxygène on règle la pression d'utilisation entre 0,1 à 0,2 bar environ.

Mêmes précautions que pour l'oxygène dans la manipulation des tubes. Éviter les fuites et éteindre aussitôt si le feu prend au raccord de la bouteille. Avec l'air, et à plus forte raison avec l'oxygène, l'acétylène forme un mélange détonant très violent.

**Générateurs d'acétylène.** — De moins en moins utilisés, sauf dans les grosses centrales de production.

**Distribution de gaz.** — ***Poste individuel.*** — Composé d'une bouteille d'oxygène, et d'une bouteille d'acétylène dissous, chaque bouteille étant munie de son détendeur. Le poste peut être fixe, ou mobile; dans ce cas, les deux bouteilles sont montées sur un chariot.

***Postes multiples fixes.*** — Les ateliers sont équipés d'une centrale de détente, située hors de l'atelier, dans un endroit facilement accessible aux camions.

Pour chaque gaz, on dispose deux rampes de plusieurs bouteilles (de 2 à 6 généralement), une rampe en service, et une rampe en attente.

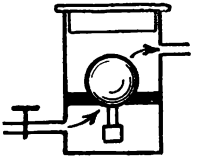


Fig. IV-35.
Soupape sèche.

Pour éviter toute interruption dans l'alimentation, chacune des rampes est branchée sur le mano-détendeur central, et un jeu de vannes permet de mettre, instantanément, l'une ou l'autre des rampes en service.

L'oxygène est détendu de 3 à 5 bar, et l'acétylène à $\approx$ 1 bar. De là, les gaz sont distribués dans l'atelier par des tuyauteries (pas en cuivre pour l'acétylène), peintes aux couleurs normalisées : fond gris et anneaux jaune pour l'oxygène, fond gris et anneaux lilas, pour l'acétylène.

Chaque poste est équipé d'un petit détendeur individuel d'oxygène, et d'un appareil anti-retour pour l'acétylène (fig. IV-35).

Dans les grosses installations, on simplifie la manutention par l'utilisation de cadres contenant de 9 à 28 bouteilles, reliées ensemble. On monte deux cadres, l'un en service, l'autre en attente, et un troisième cadre est en réserve.

Il existe également un système de rampes fixes, qu'un camion vient remplir, sur place, après épuisement.

L'oxygène (et aussi l'argon) peuvent être livrés sous la forme liquide, par camions citernes. Le gaz liquéfié est stocké dans des réservoirs spéciaux à double enveloppe, isolés thermiquement très soigneusement. Ces réservoirs sont équipés d'une soupape de sûreté qui limite la pression à 10-20 bar maxi., et complétés par un évaporateur.

**Chalumeaux.** — Des tuyaux souples en caoutchouc conduisent les gaz du détendeur et de la soupape, vers le chalumeau. C'est dans le chalumeau que se fait le mélange des deux gaz, et à son extrémité que ce mélange brûle.

Il existe des chalumeaux dits « à haute pression » qui ne fonctionnent qu'avec l'acétylène dissous ou les générateurs à haute pression.

Les plus répandus sont les chalumeaux à « basse pression » (fig. IV-36) qui fonctionnent indifféremment en haute ou basse pression. Ces chalumeaux sont construits de telle sorte que l'oxygène

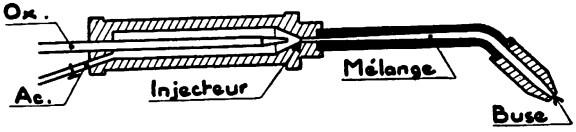



Fig. IV-36. — Schéma d'un chalumeau à basse pression.

entraîne l'acétylène par aspiration à l'aide d'un injecteur. Cette disposition est indispensable avec l'acétylène à basse pression pour obtenir les proportions convenables du mélange — volumes égaux — malgré les différences de pression : 0,015 à 0,030 bar pour l'acétylène et 1 bar pour l'oxygène.

Pour les travaux de série, on emploie les chalumeaux à débit fixe d'oxygène, mais pour les travaux courants, on préfère les chalumeaux à débit variable. La variation du débit est obtenue par le changement de l'injecteur et de la chambre de

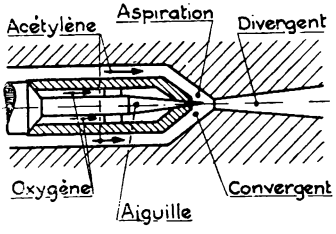



Fig. IV-37.
Injecteur en position fermée.

mélange, ou plus couramment par la manœuvre d'une aiguille de réglage (fig. IV-37). La puissance du chalumeau peut être modifiée également par le changement de la « buse ou bec ». Un nombre marqué sur la buse indique le débit horaire d'acétylène qui peut varier de 10 l/h à 10 000 l/h.

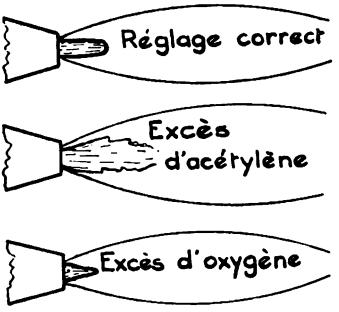


Fig. IV-38. — Réglage de la flamme.

Couramment, on utilise surtout les chalumeaux n° 0 qui possèdent — d'après les nouvelles normes — un jeu de buses de 50, 70, 100, 140 et 200 l/h, et le n° 1, un jeu de buses de 250 à 1 000 l/h.

*Réglage de la flamme.* — La flamme est bien réglée lorsque le contour du dard bleuté est bien net (fig. IV-38). Avec un excès d'acétylène le dard a un contour irrégulier. L'excès d'oxygène est plus à redouter car il est plus difficile à déceler : il se traduit par un dard plus réduit et plus pointu (fig. IV-38).

*Accessoires.* — Le soudeur travaille sur une table métallique garnie de matière réfractaire (ciment et terre réfractaire), et il se protège les yeux avec des lunettes vertes ou bleues.

Des dispositifs économiseurs montés sur les canalisations ou dans les chalumeaux ferment les gaz dès que le chalumeau n'est plus utilisé pour éviter le gaspillage des gaz à l'arrêt.

Le métal d'apport employé pour l'acier est généralement de l'acier de classe A (parfois de classe C ou XC) à bas carbone et de bonne qualité en baguettes de 1 à 6 mm de diamètre.

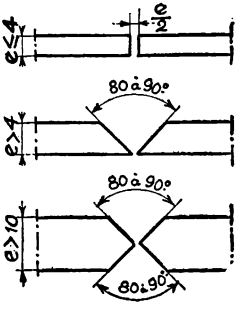


Fig. IV-39.
Soudage bord à bord.

**Préparation des soudures.** — Jusqu'à 4 mm d'épaisseur, les bords des tôles sont juxtaposés avec un jeu égal à la moitié de l'épaisseur environ. Au-dessus de 4 mm, on chanfreine sur une face à 90° et pour les fortes épaisseurs, on fait un double chanfrein, de 80 à 90° (fig. IV-39).

En angle, intérieur ou extérieur, le soudage se fait sans préparation (fig. IV-40).

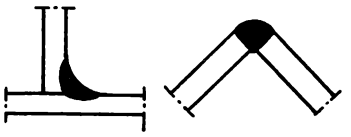


Fig. IV-40. — Soudage d'angles.

**Méthodes de soudage.** — ***Soudage à gauche.*** — Le chalumeau se déplace de la droite vers la gauche d'un mouvement d'avance uniforme, sans balancements ni mouvements giratoires.

La figure IV-41 indique la position du fil et du chalumeau. Par de petits mouvements de faible amplitude, on dépose le fil dans le bain de fusion.

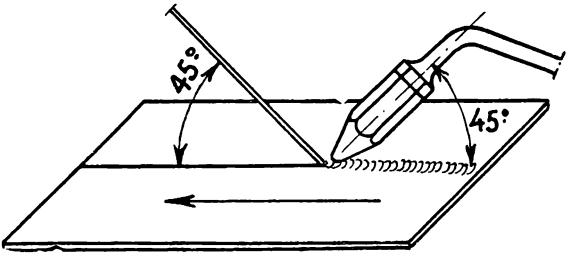



Fig. IV-41. — Soudage à gauche.

Puissance du chalumeau en pleine tôle : 100 litres par millimètre d'épaisseur pour les aciers. Diamètre du fil d'apport : $\frac{e}{2} + 1$ mm.

Cette méthode s'applique surtout aux tôles minces des différents métaux et alliages.

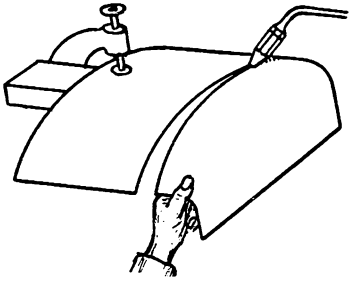


Fig. IV-42. — Soudage à gauche sans apport de métal.

***Soudage à gauche sans apport de métal.*** — C'est la soudure des tôliers (jusqu'à 1,5 mm). Les 2 bords *parfaitement ajustés* sont fondus après pointage ou mieux sans pointage. Dans ce cas, le guidage est assuré par l'ouvrier qui, par le déplacement de l'une des tôles — l'autre étant fixée — maintient les bords en contact étroit et dans le même plan (fig. IV-42).

La dilatation de la zone chaude et le retrait de la zone refroidie exercent sur les deux bords une pression qui les refoule et compense la perte du métal due à la fusion. Bec de 100 litres par millimètre d'épaisseur pour les aciers.

***Soudage en angle extérieur.*** — S'exécute comme le soudage à plat et à gauche généralement. Chalumeau 25 % plus faible qu'à plat.

***Soudage en angle intérieur.*** — Avec cette disposition, il ne peut être question de traverser. Les 2 faces des tôles sont fondues superficiellement pour assurer la liaison, et on compense le manque de pénétration par un apport de métal plus important. Chalumeau 25 % plus fort qu'à plat.

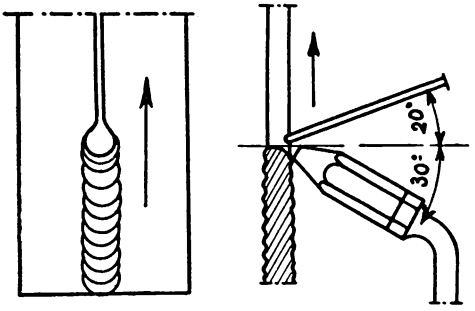



Fig. IV-43.
Soudage en montante à double cordon A.

***Soudage montant.*** — *A double cordon A.* — On place les tôles verticalement et avec la flamme on perce un trou (fig. IV-43) qui est maintenu durant tout le soudage. Le métal est déposé sur l'épaisseur de la tôle (fig. IV-43) et forme un cordon sur les 2 faces.

Ce procédé donne d'excellents résultats dans la construction des réservoirs à pression en tôle de 2 à 6 mm.

De 6 à 10 mm les bords sont chanfreinés ; au-dessus de 10 mm on soude en 2 passes par longueurs de 50 à 60 mm.

Débit du chalumeau : 50 litres par millimètre d'épaisseur ; diamètre du fil d'apport : de 2 à 3 mm.

*A double cordon B.* — Du même principe que le précédent, ce soudage est exécuté par 2 soudeurs qui opèrent chacun sur une face de la tôle (fig. IV-44). Les soudures obtenues sont étroites et donnent toute garantie au point de vue résistance avec le minimum de déformations.

Cette méthode s'applique aux tôles accessibles sur les 2 faces de 6 à 12 mm d'épaisseur sans chanfreinage.

Chaque chalumeau débite 25 litres par millimètre d'épaisseur et le diamètre du fil est de 3 mm environ.

*A double cordon C.* — Convient pour les tôles épaisses et ne se différencie du précédent que par sa préparation ; les bords sont chanfreinés en X (fig. IV-58) et au-dessus de 20 mm d'épaisseur il est conseillé de faire la soudure en 2 passes.

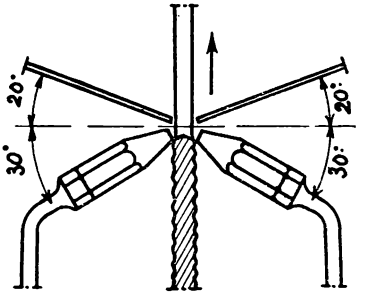



Fig. IV-44. — Soudage en montante à double cordon B.

**Soudage des divers métaux et alliages.** — Tous les métaux et alliages non ferreux peuvent se souder au chalumeau, avec des coefficients de soudabilité variables. Toutefois, on soude de plus en plus à l'arc électrique sous flux gazeux (voir page 246).

Le *cuivre* se soude difficilement au chalumeau, en raison de sa fluidité à chaud et de son excellente conductibilité thermique.

Pour les *laitons*, on utilise une flamme oxydante ; celle-ci provoque la formation d'une couche d'oxyde sur le bain, qui s'oppose à l'oxydation du zinc.

L'*aluminium* se soude très bien avec un flux qui dissout la couche d'alumine. Après soudage, un rinçage est nécessaire pour éliminer toute trace du flux, lorsqu'il est corrosif.

Le *plomb* se soude uniquement au chalumeau (buses de 20 à 50 l/h) sans flux, sur bords bien grattés et à recouvrement pour les tôles minces.

## SOUDAGES ÉLECTRIQUES A L'ARC

**Principe.** — Soudages autogènes par fusion, avec apport de métal (sauf exceptions), dans lesquels la fusion est obtenue par la chaleur dégagée par un arc électrique.

Une borne du circuit est reliée à la pièce, l'autre à l'*électrode* qui

peut être : *soit, le fil d'apport* (électrode consommable), *soit réfractaire*, le fil d'apport étant indépendant du circuit. On fait jaillir — entre la pièce et l'électrode — un arc qui fond la pièce, au point d'impact, et le fil d'apport, qui se dépose dans le bain de fusion. La température de l'arc est de l'ordre de 4 000 °C, et la *fusion est pratiquement instantanée*, quels que soient le métal et son épaisseur, ce qui est un gros avantage, pour le soudage des tôles moyennes et épaisses.

Dans tous les cas, la *protection du bain de fusion* est indispensable, et elle est assurée :

— soit par un *enrobage* de l'électrode (fig. IV-45) ;
— soit par un *flux gazeux* autour du bain de fusion (fig. IV-46) ;
— soit par un flux *électro-conducteur* en grains (fig. IV-47) ;
— soit par un *laitier* en fusion au-dessus du bain ;
— soit par le *soudage sous vide*.

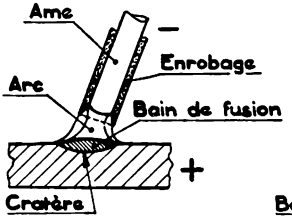



Fig. IV-45.

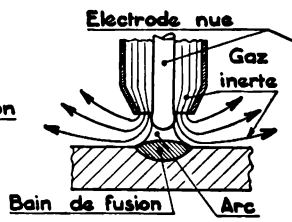



Fig. IV-46.

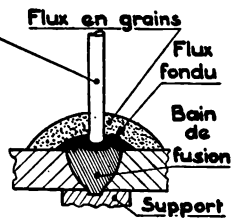



Fig. IV-47.

## SOUDAGE A L'ÉLECTRODE ENROBÉE (fig. IV-48)

Le fil d'apport sert d'électrode (électrode consommable) et il est entouré d'une gaine appelée *enrobage* (voir fig. IV-49).

**Postes de soudage.** — Rôles : abaisser la tension du réseau, régler l'intensité, et souvent, la tension du courant de soudage.

***Postes statiques.*** — Les plus répandus sont des transformateurs mono-monophasés (entre deux fils, une seule phase) qui renferment deux enroulements : un *enroulement primaire*, branché sur le réseau, développe un flux magnétique, qui induit le courant de soudage dans l'*enroulement secondaire*. En faisant varier ce flux — par une induc-

tance, une bobine de self ou un shunt magnétique — on règle l'intensité, soit par plots (réglage discontinu), soit à l'aide d'un volant (réglage continu).

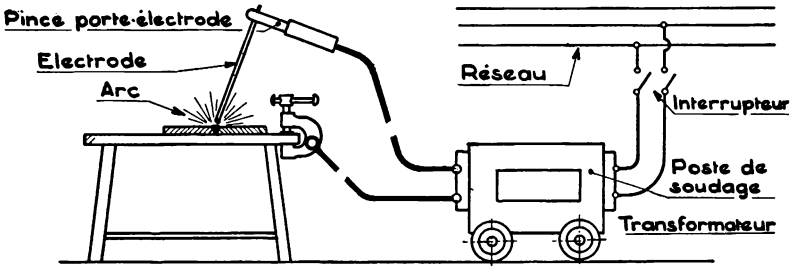



Fig. IV-48. — Soudage à l'arc à l'électrode enrobée.

*Courant d'alimentation :* alternatif monophasé : 220, 380 V, etc.

*Courant de soudage : alternatif monophasé.* Tension à vide (ou d'amorçage) : 60 à 90 V pour tôles minces, 60 V pour tôles moyennes et épaisses.

Tension en régime de soudage : 20 à 40 V.

Intensité de 50 à 500 A suivant les postes.

Ces postes peu coûteux et silencieux n'exigent aucun entretien ; par contre, ils ne permettent pas d'utiliser facilement certaines électrodes et ils n'équilibrent pas les trois phases du secteur.

***Transformateurs-redresseurs.*** — Alimentés en courant alternatif triphasé, ils débitent un *courant redressé*, dont les caractéristiques sont pratiquement les mêmes que celles du courant continu. Ils comprennent un *transformateur* triphasé, une batterie de *cellules redresseuses* au silicium, généralement, et les organes de réglage de contrôle et de protection.

Ces postes, plus coûteux, combinent les avantages des postes à courant alternatif et des génératrices; ils sont silencieux, n'exigent aucun entretien et n'ont pas de parties tournantes. De plus, ils permettent de souder avec tous les types d'enrobage.

Courant de soudage : *redressé*, avec tension à vide réglable (jusqu'à 80 V), et intensités jusqu'à 500 A et plus suivant les postes.

Leur emploi tend à se généraliser surtout en soudage semi-automatique, et automatique.

***Postes rotatifs.*** — L'élément essentiel de ces appareils est une génératrice spéciale, étudiée pour le soudage à l'arc, et qui débite du *courant continu.* On peut régler l'*intensité* (généralement par la manœuvre d'un volant qui fait varier la position des balais sur le collecteur) et parfois la tension d'amorçage, à l'aide d'un rhéostat de champ ou d'excitation.

La génératrice est entraînée par un moteur triphasé (branché sur le réseau) qui peut être séparé de la génératrice ou bobiné dans la même carcasse (groupes monobloc). Sur chantiers, on utilise des groupes électrogènes : entraînement par moteur à essence, Diesel, etc.

COURANT DE SOUDAGE : continu. Tension à vide ou d'amorçage : 50 à 80 V. Tension en régime de soudage : 20 à 40 V. Intensité : 20 à 250 A, 30 à 300 A, 50 à 500 A, etc., suivant le type de poste.

Postes coûteux, souvent bruyants, parties tournantes ; équilibrage du réseau triphasé, et utilisation de tous les types d'électrodes.

Tous ces postes sont généralement montés sur chariot.

**Électrodes.** — Baguettes de métal de même nature — ou de nature très voisine généralement — que le métal à souder. Diamètre de 1 à 8 mm (couramment 3,2 mm, 4 mm et 5 mm). Longueur de 225 à 450 mm. Le fil métallique, ou âme, est enrobé dans une gaine de produits complexes, appelée enrobage (fig. IV-49) dont les rôles sont multiples ; *sans enrobage, il est impossible de souder.*

*Rôle électrique :* rendre l'air conducteur (ionisation de l'air). Sans enrobage, il n'est pas possible d'amorcer l'arc et de le maintenir amorcé en courant alternatif.

*Rôles physiques :* guidage de l'arc par le retard à la fusion de l'enrobage (fig. IV-50). Action sur la forme du dépôt qui peut être plat, semi-bombé ou bombé (fig. IV-51) par l'action du volume, de la densité, de la viscosité, etc., du laitier.

Fig. IV-49. — Electrode enrobée.

Fig. IV-50.

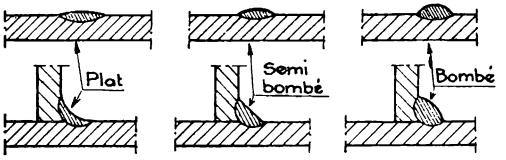



Fig. IV-51.

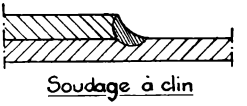



Fig. IV-52.

*Rôle chimique :* protection contre l'action de l'air (oxydation et nitruration) pendant la fusion et pendant le refroidissement, par la gaine gazeuse et par le laitier.

*Rôle métallurgique :* incorporation dans la soudure d'éléments d'addition pour en améliorer les propriétés, et pour le soudage d'aciers spéciaux.

***Types d'enrobages.*** — Il existe un très grand nombre de types d'enrobages — les perfectionnements sont incessants — et la place réservée ici ne permet que d'esquisser une classification se référant aux constituants.

*Type oxydant* (éléments principaux : oxyde de fer et oxydes métalliques). Dépôt plat de bel aspect et laitier abondant. Facile à utiliser *à plat.* Résistance faible.

*Type acide* (silice, alumine). Dépôt plat ou semi-bombé, strié régulièrement. Laitier abondant. Pour soudures d'angles *à plat.* Très bonnes caractéristiques mécaniques.

*Type rutile* (oxyde de titane et quelques matières organiques). Dépôt semi-bombé ; laitier visqueux qui n'est pas gênant. Pour soudures en position. Bonnes caractéristiques mécaniques. *Très utilisé.*

*Type cellulosique* (cellulose, farine de bois, amiante, etc.). Produits volatils ne donnant que peu ou pas de laitier ; soudures très bombées avec stries très marquées. Pour soudage en position. Caractéristiques mécaniques bonnes.

*Type basique* (carbonate de chaux, spath-fluor). Dépôt bombé ou semi-bombé. Excellentes propriétés mécaniques, très bonne résilience ; pour soudures de haute résistance. *Très utilisé.*

*Type à haut rendement.* Poudre de fer ajoutée dans l'enrobage : augmente la quantité de métal déposé, par électrode.

*Type à forte pénétration.* Constituants, appartiennent aux types rutile, acide ou cellulosique. Avec ces électrodes, on peut souder *sans chanfrein* 2 tôles de 20 mm d'épaisseur en 2 passes : une de chaque côté.

*Type pour aciers faiblement alliés ou fortement alliés.* Parfois l'âme est en acier non allié, et c'est par l'enrobage que l'on apporte les éléments d'addition.

La plupart de ces électrodes fonctionnent indifféremment en courant alternatif ou continu (pôle — à l'électrode) sauf certaines électrodes spéciales, du type basique en particulier, qui exigent du courant continu avec le pôle + à l'électrode.

**Outillage complémentaire.** — Deux câbles souples branchés aux bornes du poste, sont reliés l'un, à la pince porte-électrode à manche isolé, l'autre, à un serre-joint fixé sur la pièce ou sur la table de soudage (fig. IV-48). Avec du courant continu le pôle + (positif) est généralement relié à la pièce.

Comme pour tous les soudages à l'arc, un écran est indispensable pour protéger le visage et plus particulièrement les yeux du soudeur. L'arc électrique émet, en plus de la lumière visible, des rayons ultra-violets et infra-rouges qui sont dangereux pour la vue, et qui sont arrêtés par les verres filtrants de l'écran.

Par des gants de cuir, le soudeur s'isole du courant et protège ses mains contre les rayons ultra-violets (coups de soleil) et contre la projection de gouttelettes de métal en fusion. Avec un marteau à piquer (fig. IV-53) et une brosse métallique, on fait disparaître le laitier laissé par la combustion de l'enrobage.

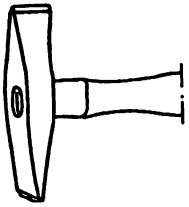


Fig. IV-53. — Marteau à piquer.

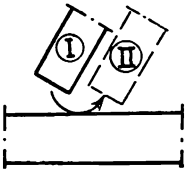



Fig. IV-54. — Amorçage de l arc.

**Méthodes de soudage.** — L'intensité varie avec le ∅ de l'électrode, le type d'enrobage, et aussi, avec l'épaisseur de la tôle. On peut utiliser la relation suivante, pour un réglage approximatif : I = 20 à 30 A, par millimètre de ∅ de l'électrode, jusqu'à 2 mm de ∅, et de 30 à 50 A, par millimètre de ∅ de l'électrode, pour les ∅ supérieurs à 2 mm.

Fixer le câble de masse sur la pièce ou sur la table en évitant les mauvais contacts. L'écran étant très foncé, l'ouvrier est obligé de se découvrir pour amorcer l'arc. Il approche l'extrémité de l'électrode très près du point de soudure (1 cm environ), puis après s'être couvert de son écran, il frotte *légèrement* l'électrode sur la pièce en relevant aussitôt (fig. IV-54). Lorsque l'arc est amorcé, il maintient sa longueur constante (2 à 3 mm) par une descente régulière.

L'avance se fait de gauche à droite et très régulièrement (fig. IV-55). Sans mouvements transversaux on obtient une passe étroite dont la

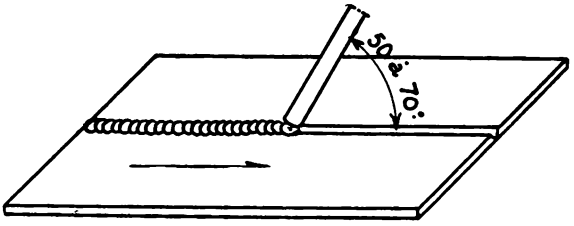



Fig. IV-55. — Position et avance de l'électrode (soudage à plat).

largeur est un peu supérieure au diamètre de l'électrode. En balançant l'électrode on fait une passe large : $L = 3\ d$ environ (fig. IV-56).

Un dépôt important est obtenu par la juxtaposition et la superposition des cordons de soudure (fig. IV-57).

*Il est indispensable de piquer et de brosser parfaitement les cordons à chaque reprise pour faire disparaître toute trace de laitier.*

Il existe des électrodes dont l'enrobage — qui est épais — fond avec un léger retard sur le métal, ce qui permet de poser l'électrode sur la pièce sans risque de collage (soudage automatique manuel fig. IV-56).

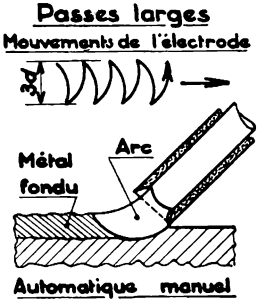



Fig. IV-56.

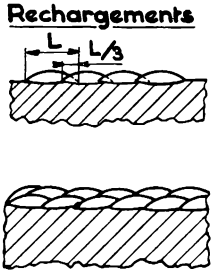



Fig. IV-57.

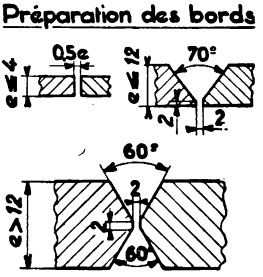



Fig. IV-58.

***Soudage à plat.*** — *Préparation.* — Les bords doivent être préparés avec plus de soin que pour le soudage au chalumeau. Jusqu'à 4 mm d'épaisseur les deux tôles sont présentées bord à bord avec un jeu égal à la moitié de l'épaisseur environ.

A partir de 5 mm on chanfreine d'un seul côté et pour les fortes épaisseurs sur les deux faces lorsqu'elles sont accessibles. A la base du chanfrein, un petit plat facilite l'exécution de la première passe (fig. IV-58).

Sur les tôles très épaisses, on fait des chanfreins spéciaux (fig. IV-59) qui réduisent la quantité de métal déposé.

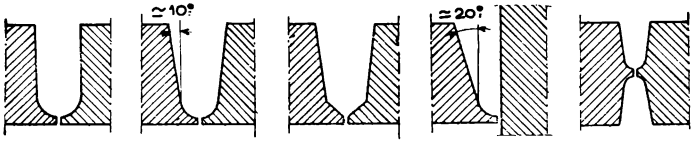



Fig. IV-59. — Chanfreins pour tôles très épaisses.

*Exécution.* — Jusqu'à 4 mm on soude par moitié de chaque côté en retournant la tôle, lorsque c'est possible.

Au-dessus de 4 mm (bords chanfreinés) la passe du fond est faite avec une électrode de petit diamètre, en surveillant la régularité du traversé si la face opposée n'est pas accessible. Le chanfrein est rempli par une série de passes (fig. IV-60) dont le nombre varie avec l'épaisseur de la tôle, le diamètre des électrodes utilisées, et le type de passes choisi. Les figures IV-60 à IV-62 montrent comment on peut souder les mêmes pièces, d'une part, en passes étroites, et d'autre part, en passes larges, avec de grosses électrodes. Chaque fois que la chose est possible, il y a avantage à faire une reprise à l'envers, et des passes alternées, pour équilibrer les déformations (fig. IV-61).

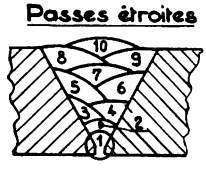



Fig. IV-60.

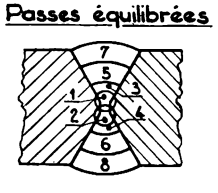
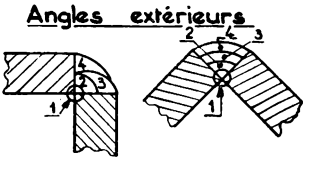
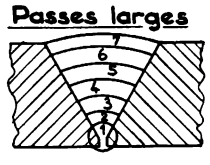
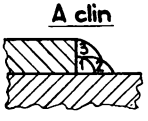



Fig. IV-61.



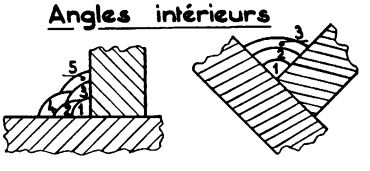




Fig. IV-62.

***Soudage en angle extérieur.*** — La soudure s'exécute comme à plat, dans le chanfrein formé par l'épaisseur des tôles (fig. IV-62).

***Soudage en angle intérieur ou à clin*** (voir fig. IV-52 et IV-61). — Lorsque la pièce peut être déplacée facilement, il est conseillé de l'incliner comme figure IV-62 (à droite).

La passe du fond est exécutée avec une électrode de petit diamètre et souvent en soudage automatique manuel. Suivant l'épaisseur, on fait ensuite une ou plusieurs passes larges ou étroites. Sur les pièces qui ne peuvent pas être inclinées on opère par passes larges ou étroites disposées comme l'indique les figures IV-61 et IV-62.

Toutes ces soudures bord à bord ou en angle peuvent être réalisées en soudures montantes ou descendantes (fig. IV-63 et IV-64).

Le soudage en corniche et au plafond est plus difficile et exige un tour de main qui ne s'acquiert que par la pratique du métier.

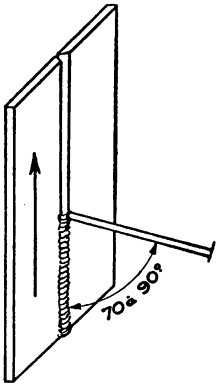



Fig. IV-63. — Soudage montant.

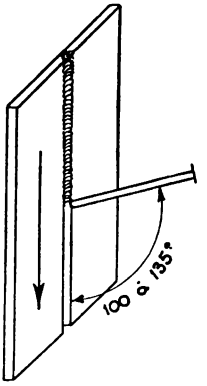



Fig. IV-64. — Soudage descendant.

*Dans tous les cas*, une soudure ne peut être réalisée correctement qu'à la condition d'observer certaines règles précises.

L'intensité doit convenir exactement au diamètre et à l'enrobage de l'électrode. Les indications fournies à ce sujet par les fabricants du poste et des électrodes seront complétées utilement par un essai pratique. On peut observer qu'avec une même électrode, un excès d'intensité donne un dépôt qui s'étale, alors qu'avec une intensité trop faible le dépôt prend la forme sphérique aplatie (fig. IV-65).

Si l'électrode rougit sur une grande longueur l'intensité est trop élevée. En règle générale, l'électrode ne doit pas rougir sur plus de 1 cm environ.

Fig. IV-65.

L'arc est toujours maintenu très court et l'avance est aussi régulière que possible. Avec une avance trop rapide, le laitier risque de s'incorporer au métal.

Une chute de tension sur le réseau d'alimentation est toujours une cause de mauvais fonctionnement des postes statiques.

**Défauts des soudures** (voir fig. IV-146 et IV-147). — Le manque de pénétration est dû à une préparation défectueuse du chanfrein ou à une mauvaise exécution de la première passe. Les collages ont pour causes un arc trop long, une avance trop rapide ou une intensité trop faible. Le laitier peut se trouver inclus dans le métal (piquage insuffisant) ou au cours même du soudage : avance trop rapide, mauvaise tenue de l'électrode, intensité insuffisante.

**Métaux et alliages soudables.** — Ce soudage à l'arc est surtout utilisé pour les métaux ferreux : aciers non alliés, aciers faiblement alliés, aciers inoxydables, aciers réfractaires, aciers plaqués.

*Aciers inoxydables.* — Les *austénitiques* présentent d'excellentes qualités de soudabilité à l'arc à partir de 2 mm. La soudabilité des *ferritiques* est moins bonne et on les soude avec des électrodes austénitiques.

L'aluminium se soude également, mais on préfère pour ce métal et ses alliages, le soudage au chalumeau et surtout sous flux gazeux.

## SOUDAGES ÉLECTRIQUES A L'ARC SOUS FLUX

### Soudages sous flux gazeux.

***Principe*** (voir fig. IV-46). — L'arc est amorcé entre une électrode réfractaire nue — ou entre le fil d'apport nu, qui sert d'électrode — et la pièce à souder. Un flux gazeux — qui peut être inerte, ou oxydant — de faible débit (de 5 à 15 l/mn), sort d'une buse réfractaire qui entoure l'électrode (fig. IV-46). Ce flux a pour rôle de protéger l'arc, le bain de fusion, et le métal en cours de refroidissement, contre la contamination par l'oxygène et par l'azote de l'air. Parfois, la protection est étendue, sur l'endroit, et à l'arrière de la soudure, par un « traînard » (soudure en cours de refroidissement), et sur l'envers du cordon, par une enceinte, avec circulation de flux gazeux.

Les métaux particulièrement sensibles à l'action de l'oxygène, de l'azote, de l'hydrogène, etc. (titane, zirconium) sont soudés dans des enceintes fermées, rigides, ou plastiques, appelées « *boîtes à gants* ». Dans ces enceintes, on fait le vide, puis on remplit d'argon, ou d'hélium (avec une ou plusieurs purges, s'il y a lieu), afin d'éliminer toute trace de gaz étranger.

Le soudeur manipule sa torche, et le fil, à l'aide de gants étanches, et il observe son travail par un grand hublot. Protection parfaite, mais coûteuse.

Le courant arrivant très près de l'arc (40 à 50 mm), il est possible de souder avec des intensités élevées (jusqu'à 180-250 A/mm² de section du fil), ce qui autorise de grandes vitesses d'avance.

On soude souvent les non-ferreux sur des baguettes supports (voir fig. IV-70 et IV-80), avec une rainure qui limite le traversé, et qui, de plus, protège l'envers du contact de l'air.

## Soudage à l'électrode réfractaire (Procédé TIG)

L'électrode nue est en tungstène, et les gaz protecteurs sont l'*argon* et l'*hélium*, ou un mélange de ces deux gaz (fig. IV-66).

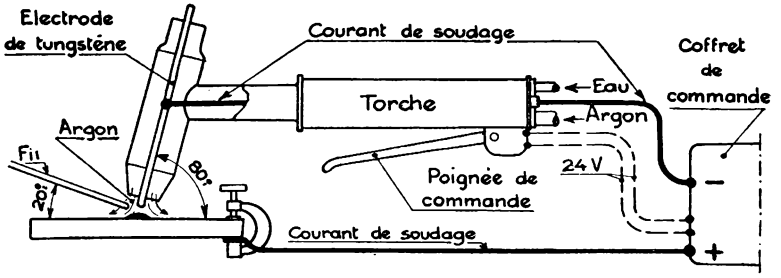



Fig. IV-66. — Schéma d'une torche de soudage à l'argon.

On peut souder en courant alternatif ou en continu, sans apport de métal (tôles minces) et, plus couramment, avec apport de métal; dans ce cas, le fil d'apport est indépendant du circuit électrique. Intensité : de 30 à 80 A par millimètre d'épaisseur.

***Soudage TIG en courant alternatif*** (pour alliages légers). — A chaque alternance, la couche d'alumine recouvrant le métal est brisée, ce qui permet la liaison des bords et du fil en fusion.

Un transformateur classique de soudage à l'arc peut convenir, ou mieux, un appareil spécial auquel on ajoute un stabilisateur d'arc (fig. IV-67) qui superpose, au courant de soudage, un courant

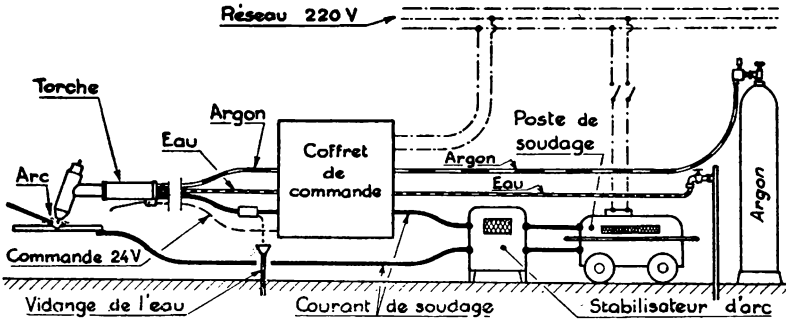



Fig. IV-67. — Soudage avec électrode réfractaire en courant alternatif.

de haute fréquence et de haute tension ; ce courant est fourni par un générateur à étincelle-pilote, ou par un stabilisateur à impulsions (éclateur ou lampe), qui rend l'argon conducteur (ionisation), en entretenant une étincelle-pilote entre l'électrode et la pièce.

*Soudage en courant continu* (pour aciers inoxydables, métaux cuivreux, aciers).

Le courant est fourni par un poste à redresseurs (cellules redresseuses au silicium généralement) et plus rarement par une génératrice, sans stabilisateur d'arc, le pôle + étant relié à la pièce.

Que ce soit en alternatif ou en continu, ces appareils sont complétés par un *coffret de commande*. Par l'intermédiaire d'un interrupteur à poignée, et d'un circuit à 24 V, le coffret commande les séquences de soudage ; à la mise en route : ouverture de l'argon et mise sous tension, puis à l'arrêt : rupture du courant et fermeture de l'argon, *avec un peu de retard*, pour que l'électrode et la soudure soient protégées pendant leur refroidissement.

La *torche*, dont la buse est en matière réfractaire, est refroidie à l'eau — sauf dans les petits modèles — soit en circulation libre, à eau perdue, soit en circuit fermé (réservoir avec pompe). A la torche, aboutissent les fils d'amenée du courant, les conduites d'argon et d'eau et le circuit de 24 V.

On soude en manuel, ou en automatique (voir p. 253).

Le soudage TIG coûteux donne d'excellentes soudures, et il est plutôt réservé pour les fabrications soignées en alliages légers, inoxydables, alliages cuivreux (industries chimiques, nucléaires, etc.).

## Soudage à l'électrode fusible (ou consommable).

On dit plutôt *soudage semi-automatique.*

C'est entre le fil d'apport nu (fil électrode), et la pièce, que l'on fait éclater l'arc (fig. IV-68) dans un gaz ou un mélange de gaz de compositions variées, que l'on peut classer en deux catégories : *gaz inertes* et *gaz oxydants.*

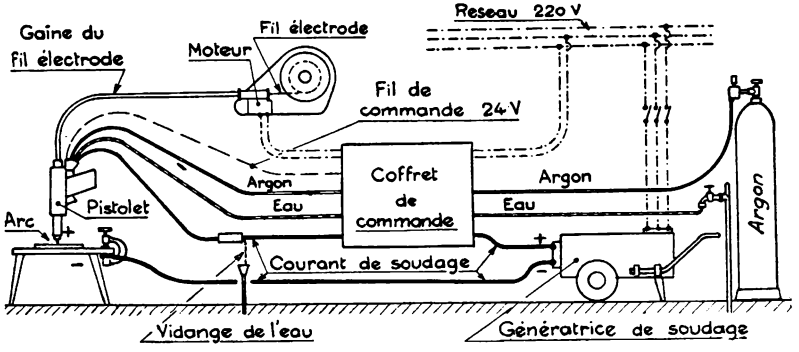



**Fig. IV-68. — Soudage à l'électrode fusible, sous argon, en courant continu.**

*Gaz inertes :* argon, hélium, ou mélanges de ces deux gaz.

*Gaz oxydants :* argon + $CO_2$; argon + oxygène; argon + hélium + oxygène; $CO_2$ pur (dioxyde de carbone ou anhydride carbonique). Ces gaz sont fournis, comme l'oxygène, comprimés dans des tubes, ou liquéfiés (voir p. 232).

Généralement, on désigne le procédé par *MIG*, dans la plupart des cas, et parfois par *MAG*, pour le soudage des aciers sous $CO_2$.

Le courant est continu (pôle + à l'électrode) et fourni surtout par des postes à redresseurs, et aussi par des génératrices.

Le fil nu est en couronne (de 5 à 20 kg et plus, d'un ∅ de 0,8 à 2,4 mm) et de même nature que le métal à souder généralement. Pour le soudage sous $CO_2$, ou mélanges oxydants, le fil contient des éléments désoxydants (silicium, manganèse, aluminium).

Un cuivrage superficiel évite l'oxydation et facilite le passage du courant.

Sous $CO_2$ on utilise aussi du fil dit « fourré »; c'est un petit tube (⌀ ext. 2,4 mm) contenant une poudre rutile ou basique, dont le rôle est analogue à celui des enrobages des électrodes ordinaires.

La bobine de fil est logée dans un dévidoir, équipé, à la sortie, de galets entraîneurs commandés par un moteur à vitesse variable, et réglable facilement (de 1 à 20 m/mn) en liaison avec l'intensité, et suivant la nature du métal, son épaisseur, le ⌀ du fil, etc.

Le fil aboutit à une torche à refroidissement naturel, généralement, ou à un pistolet (fig. IV-68 *bis*) refroidi à l'eau, et parfois à l'air, dans les gros modèles.

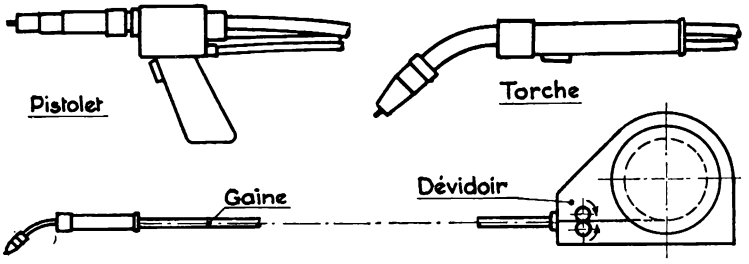



Fig. IV-68 *bis* — Soudage semi-automatique.

La torche est reliée au dévidoir par une gaine (fig. IV-68 *bis*) dans laquelle passent le fil, le gaz protecteur, le circuit de commande à 24 V, et éventuellement l'eau (ou l'air) de refroidissement.

Lorsque la gaine ne dépasse pas 3 m de longueur, le fil est simplement *poussé* vers la torche dans une petite gaine en plastique. Au-dessus de 3 m le fil est, de plus, tiré par des galets logés dans le pistolet. Cette solution, dite « *poussé-tiré* », a l'inconvénient d'alourdir le pistolet par le petit moteur, et de le rendre moins maniable.

Pour les aciers non alliés, on utilise deux méthodes :

EN HAUTE INTENSITÉ, le fil est pulvérisé dans l'arc, en fines gouttelettes, et se dépose dans le bain de fusion important, ce qui exige des intensités de 200 à 300 A, pour un fil de 1,2 mm de ⌀, et de 300 à 400 A, pour un ⌀ de 1,6 mm, avec une tension de l'ordre de 30 V. Uniquement pour soudures à plat, sur tôles au-dessus de 4 mm.

EN ARC COURT, le fil plonge dans le bain de fusion, ce qui fait un court-circuit qui éteint l'arc, qui se rallume aussitôt. Ce régime pulsatoire est fourni par des générateurs spéciaux dont la tension est insuffisante pour entretenir un arc permanent ($U \approx 20$ V aux bornes de

l'arc). Le fil d'apport a un diamètre de 0,8 à 1,2 mm maxi. et les intensités varient de 50 à 200 A max. Pour *tôles minces* et *soudures en position.*

**Applications.** — Sous ses formes diverses, le soudage semi-automatique s'est largement développé. Malgré le prix de son installation, et des gaz, il concurrence sérieusement les électrodes enrobées, dans de nombreuses applications, en aciers non alliés (*rapidité d'exécution*, pas de fumées, pas de laitier, etc.).

Avec le mélange argon + $CO_2$ (15 %), le plus utilisé, on soude les aciers non alliés, et faiblement alliés; sous argon + $O_2$ (3 %) les mêmes métaux, quand on désire des caractéristiques mécaniques élevées (résilience); sous argon + hélium (30 %) + $CO_2$ (3 %), et argon + $O_2$ (1 %), on soude les inoxydables.

**Soudage sous flux électro-conducteur ou flux solide, ou à arc submergé** (pour aciers, épaisseurs moyennes et fortes surtout). — Soudage à électrode fusible, dans lequel l'arc est protégé par un flux en grains : l'arc n'est jamais visible, les intensités sont très élevées et le bain de fusion peut être très important. Le dégagement de chaleur est provoqué par le passage du courant à travers le flux en fusion, en partie par effet Joule, et en partie par l'arc sous le flux.

Le flux a un rôle protecteur : flux fondu qui surnage sur le bain de fusion, et qui, sous forme de laitier, protège la soudure pendant le refroidissement ; de plus, il apporte des éléments d'addition dans le bain de fusion : manganèse surtout. Stocké dans un réservoir, le flux est distribué par un conduit placé en avant de l'électrode, et souvent, un aspirateur récupère, à l'arrière, le flux non fondu (fig. IV-69).

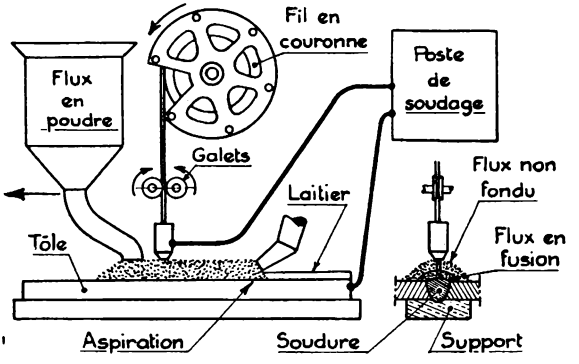



Fig. IV-69. — Principe du soudage automatique sous flux.

On soude, en alternatif et surtout en *courant continu* ou *redressé*, avec des postes très puissants (jusqu'à 4 000 A sous 40 V). Les électrodes sont de qualités différentes, suivant le métal à souder et leur diamètre varie de 2 à 8 mm (parfois 12 mm). Surtout utilisé en soudage automatique, avec des têtes de soudage analogues à celles que l'on utilise pour le soudage sous flux gazeux, à électrode fusible (voir soudage automatique).

## Exécution des soudures.

***Préparation des bords.*** — Tous les procédés de soudage sous flux gazeux ou électro-conducteur exigent une *préparation très soignée* des bords : ajustage et forme des chanfreins, position relative des deux bords, écartement, etc. et un *décapage parfait* des bords, qui élimine toute trace de *corps gras* ou d'oxydes (particulièrement pour le soudage sous argon et sous flux électro-conducteur). Les chanfreins sont analogues à ceux des figures IV-58 et IV-59.

Les mors des montages sont en cuivre (fig. IV-70) ou en bronze (non magnétiques) et l'envers de la soudure est souvent soutenu (fig. IV-70). Pour les aciers, le support est parfois un plat en acier, dans ce cas, il est soudé avec les tôles, soit à plat, soit en corniche (fig. IV-71).

Souvent, on ajoute des « talons » (fig. IV-71 *bis*) qui sont coupés après soudage, afin d'obtenir des extrémités de soudures saines et sans retassures, et sans effondrements.

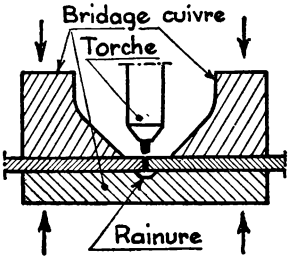



Fig. IV-70. — Montage de bridage en cuivre, avec rainure à l'envers de la soudure.

Fig. IV-71.

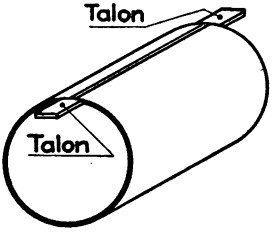



Fig. IV-71 *bis*.

***Soudage manuel*** (procédé TIG). — Ce procédé s'apparente au soudage au chalumeau, à plat et à gauche (fig. IV-66), en demi-mon-

tante et en montante; le fil est très incliné. On doit surtout éviter tout contact entre l'électrode et la pièce, ce qui contamine le bain de fusion et l'électrode.

## Soudage automatique.

Tous les procédés qui viennent d'être étudiés (*TIG, MIG, MAG,* sous flux solide) peuvent être utilisés en automatique.

Le courant est fourni, le plus souvent, par des postes à redresseurs, et tous les appareils de contrôle, de commande et de réglage, sont groupés dans un coffret, appelé *tête de soudage* (voir fig. VII-78 à 80) qui comprend, en plus de la torche :

— des appareils — généralement électroniques — de réglage de la longueur de l'arc, utilisant la variation de la tension d'arc qui est fonction de sa longueur; lorsque l'arc s'allonge, la tension s'élève, ce qui rapproche la torche de la tôle, et inversement;

— un interrupteur qui ferme et ouvre le circuit de soudage;

— un système d'amorçage de l'arc par un courant de haute fréquence;

— un dispositif « d'évanouissement » de l'arc par réduction progressive de l'intensité, afin de supprimer le cratère terminal;

— pour le soudage sous flux gazeux, la commande par électrovanne de l'ouverture, avec avance, et de la fermeture, avec retard sur le courant, pour protéger l'électrode et la soudure contre le contact de l'air;

— un dévidoir, avec galets d'entraînement du fil, en couronne, à une vitesse réglable.

Après la mise en route, il ne doit pas y avoir d'intervention manuelle; toutefois, des corrections sont possibles en cours de travail, sur l'intensité, la vitesse d'avance du fil, etc.

Ces fonctions importantes de la tête de soudage doivent être complétées par le déplacement de l'arc sur la ligne de soudure, ce qui peut se faire de deux façons :

*1er cas : la tête de soudage reste fixe*, et c'est la pièce qui est déplacée par des montages : vireurs à galets (voir fig. IV-77 et IV-79) ou positionneurs (voir fig. IV-75 et IV-78) pour soudures circulaires surtout.

*2e cas : la pièce reste fixe.* La tête de soudage est montée soit sur un chariot automoteur — à vitesse variable — se déplaçant sur un chemin de roulement (fig. IV-80), soit à l'extrémité d'un bras coulis-

sant monté sur une potence roulante et réglable en hauteur (fig. IV-78 et IV-79).

Dans tous ces montages, la vitesse est réglée à l'avance, et le plus souvent on peut la modifier en cours de soudage, à l'aide d'un variateur.

Le soudage automatique est surtout utilisé pour les moyennes et grandes séries, et pour tous les métaux et alliages.

Tous ces outillages accessoires (montages, vireurs, positionneurs), indispensables au soudage automatique, sont utiles aux soudages semi-automatiques et manuels.

## SOUDAGE AU PLASMA

La source calorifique est un plasma (voir découpage, p. 89) à arc transféré, qui jaillit entre une électrode de tungstène et la pièce à souder (fig. IV-72). Plus rarement, pour les faibles épaisseurs, l'arc est « non transféré » ou « soufflé » ; dans ce cas, il éclate entre l'électrode et la tuyère.

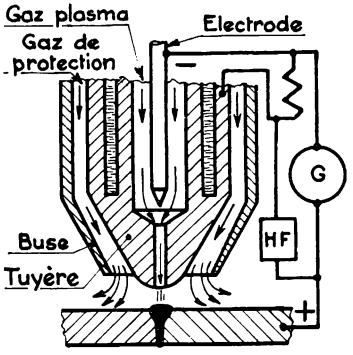



Fig. IV-72. — Schéma du soudage au plasma.

En plus du gaz nécessaire à la formation du plasma, les torches possèdent un orifice annulaire, par lequel arrivent les gaz de protection, sur l'endroit, et souvent sur l'envers de la soudure: argon, hélium, mélanges argon + hélium et argon + hydrogène.

Le courant est redressé, généralement, et comme dans le découpage, un arc pilote assure l'amorçage et la stabilisation de l'arc de soudage.

Le plasma perce un trou (effet de trou de serrure) qui se referme aussitôt au fur et à mesure de l'avance. On peut aussi souder les tôles moyennes, sans chanfreinage préalable, et contrôler visuellement le traversé, en cours de travail.

Ce procédé, qui s'apparente au soudage *TIG*, est surtout utilisé en automatique pour les non-ferreux.

Il existe également des torches manuelles de très faible puissance, avec lesquelles on peut souder des épaisseurs de quelques dixièmes (et même de centièmes) de millimètre d'épaisseur (électronique, aéronautique, industries spatiales, etc.).

## MONTAGES DE SOUDAGE

***Rôles :*** *Maintenir les bords* dans leur position relative correcte pour le pointage ou mieux le soudage sans pointage.

*Présenter la ligne de soudure* dans la position la plus favorable à l'exécution de la soudure.

*Donner un mouvement uniforme d'avance* à la ligne de soudure, l'arc restant fixe.

Il existe une très grande diversité de montages et il n'est donné, ci-après, que les schémas de quelques exemples types.

***Montages pour soudures rectilignes. — Clames*** (fig. IV-72 *bis*). — Outillage simple utilisé en soudage manuel ou semi-automatique. On peut pointer entre les clames et les enlever pour le soudage ou souder sans pointer, en enlevant les clames, au fur et à mesure de l'avance.

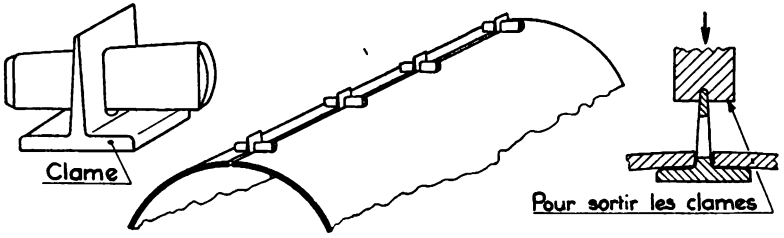



Fig. IV-72 *bis*. — Montage par clames.

***Montage de bridage.*** — Les deux bords sont pincés et maintenus solidement par des pièces mobiles articulées (fig. IV-73) : les mors sont en cuivre ou en bronze (non magnétiques).

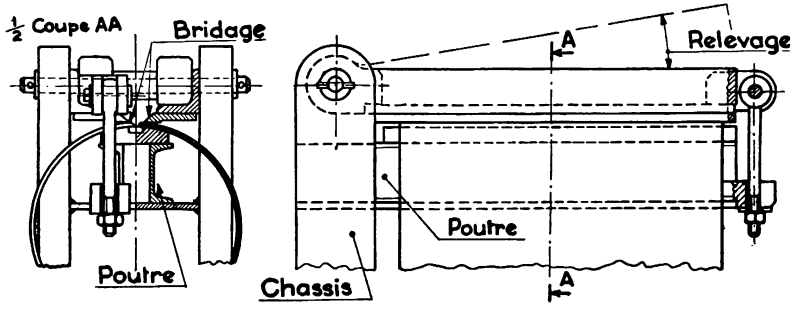



Fig. IV-73. — Montage pour soudage en ligne droite.

*Montage de pointage pour viroles* (fig. IV-74). — Un collier en deux coquilles articulées (fer plat ou fer U) maintient, par sa pression, les deux bords en parfaite coïncidence ; par les lumières, on pointe, puis on démonte le collier, pour le soudage.

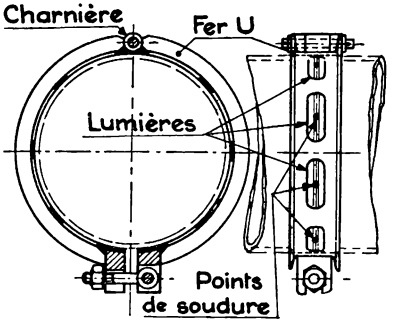



Fig. IV-74. — Montage de pointage.

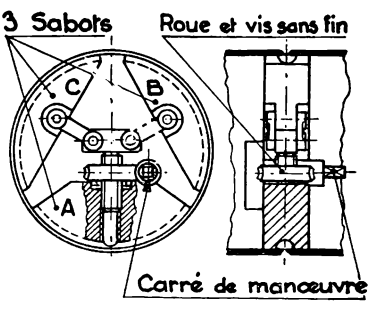



Fig. IV-74 *bis*. — Montage de soudage.

*Montage de soudage pour viroles* (fig. IV-74 *bis*). — Placé à l'intérieur de la virole, le montage présente les bords en coïncidence, par l'action de trois sabots expansibles. A l'aide d'une grande barre de manœuvre, on commande le système d'expansion puis on soude ; après soudage, la manœuvre inverse rapproche les sabots pour la sortie du montage.

**Positionneurs** (fig. IV-75 et IV-76). — Un plateau percé de mortaises pour le passage de boulons de bridage, peut tourner sur lui-même autour de son axe central. Ce plateau est monté sur un support articulé, à axe horizontal, qui permet de l'incliner à l'aide d'un secteur denté (rotation supérieure à 90°).

Par la combinaison de ces deux mouvements, il est possible de présenter la pièce dans la position où la soudure s'exécute le plus facilement. La figure IV-75 montre comment on peut faire une soudure circulaire dans un plan horizontal, puis une soudure d'angle (plateau incliné à 45°) et enfin une soudure de bride sur virole (plateau vertical). Dans un ensemble soudé (bâti de machine par exemple) il est possible de faire toutes les soudures à plat, en inclinant et en tournant le plateau convenablement, à chaque soudure (fig. IV-76).

Les positionneurs sont très employés en soudages manuel, semi-automatique et automatique ; ils se font depuis les petits modèles manœuvrés à la main, pour l'artisan jusqu'aux plus gros, capables de supporter et de déplacer des pièces de plusieurs tonnes (jusqu'à 20 t).

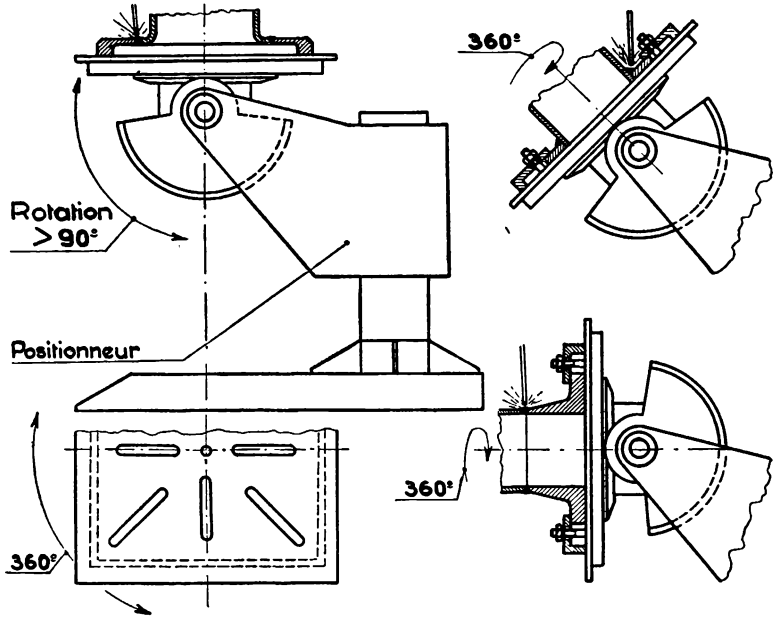



Fig. IV-75. — Positionneurs.

En soudant toujours à plat, on améliore l'aspect et la qualité des soudures ; de plus, on peut utiliser des électrodes de plus gros diamètres qu'en position (volume de métal plus important), ce qui augmente le rendement du poste de soudage, et on peut faire toutes les soudures sous flux électro-conducteur.

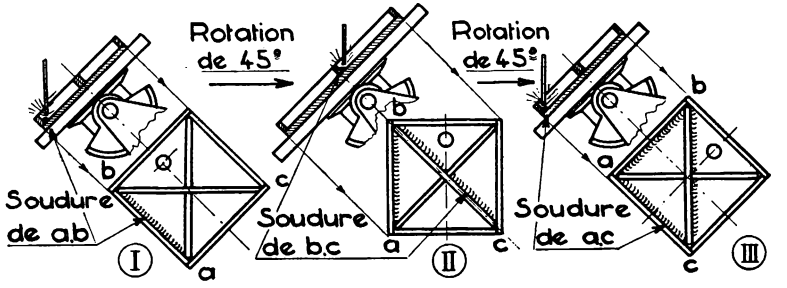



Fig. IV-76. — Présentation à plat de toutes les soudures.

**Vireurs à galets** (fig. IV-77). — Déplacement en rotation des viroles pour le soudage « en ceinture ». La virole repose sur quatre

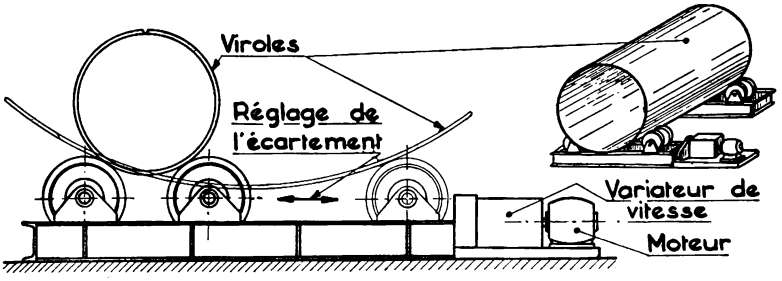



Fig. IV-77. — Vireur à galets.

galets (au minimum) métalliques ou mieux caoutchoutés ; deux de ces galets sont moteurs, et entraînent la virole en rotation, à une vitesse constante et réglable en marche, à l'aide d'un variateur, et correspondant au type de soudage. L'écartement des galets peut être modifié suivant le diamètre de la virole. Utilisés en soudages manuel, semi-automatique et automatique.

## Montages en soudure automatique.

En combinant les différents montages et leurs mouvements, avec les systèmes de déplacement des têtes de soudage, on améliore très largement la productivité des installations de soudage, ainsi que la qualité des soudures.

On voit sur la figure IV-78 et IV-79 une tête de soudage automatique montée sur une potence à l'extrémité d'un bras : celui-ci peut avancer ou reculer, monter ou descendre, et tourner afin de présenter la tête de soudage en n'importe quel point d'une fabrication. Pour les soudures rectilignes, c'est toute la machine qui se déplace sur un chemin de roulement au sol, ou le bras seulement qui coulisse dans la potence.

A l'aide d'un positionneur, on fait des soudures circulaires (fig. IV-78) dans tous les plans (voir fig. IV-75), la tête de soudage restant fixe. Sur un vireur à galets, on soude les viroles en ceinture (fig. IV-79), la tête de soudage, fixe également.

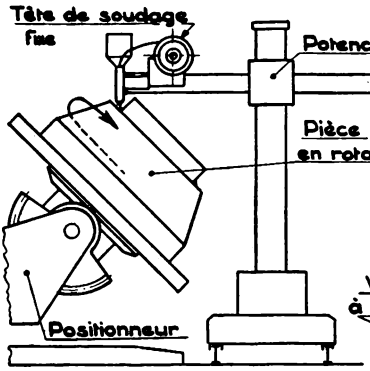



Fig. IV-78.

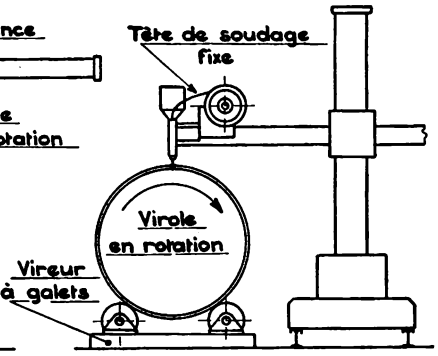



Fig. IV-79.

Soudage automatique.

Les têtes de soudage peuvent être montées sur de petits chariots automoteurs (fig. IV-80), qui se déplacent sur le chemin de roulement d'un banc. Les tôles sont maintenues dans des montages du principe de la figure IV-73 (pour soudures rectilignes).

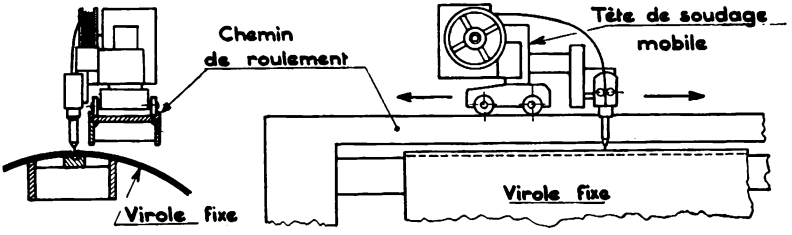



Fig. IV-80. — Soudage sur chariot automoteur.

## SOUDAGE PAR BOMBARDEMENT ÉLECTRONIQUE

Un faisceau d'électrons émis par une cathode chauffée (en tungstène ou en tantale) est accéléré et concentré (ou focalisé) par un champ magnétique, en un point appelé foyer (tension 20 000 à 30 000 V et plus). En réglant le foyer sur la ligne de soudure, les électrons libèrent leur énergie, sous forme de chaleur et portent le métal à fusion *sur une très faible largeur*. Le « canon à électrons », et la soudure, doivent être dans une enceinte sous vide ($\approx 10^{-4}$ Torr) ce qui limite les dimensions des pièces à souder. Toutefois, en utilisant

une enceinte partielle pour la soudure, avec un vide moins poussé, on peut souder des pièces de grandes dimensions.

Installations coûteuses : canons à électrons, enceintes sous vide, pompes à vide, protection contre radiations (rayons X), etc. Pour soudage métaux sensibles à la contamination par les gaz de l'air : titane, zirconium ; pour industries nucléaires et spatiales, etc.

## SOUDAGE ÉLECTRIQUE PAR RÉSISTANCE

**Principe.** — On fait traverser les pièces à souder par un courant de haute intensité et de basse tension. Le métal « fait résistance » et chauffe (effet Joule). Lorsque la température de fusion est atteinte au point de contact des tôles, on comprime fortement, réalisant ainsi une soudure comparable à la soudure à la forge. C'est un soudage autogène par pression (1) sans apport de métal.

***Soudage par points*** ou par recouvrement (fig. IV-81). — Les bords sont superposés et serrés entre 2 électrodes de cuivre *E* reliées aux bornes du transformateur *T*. Le courant traverse les pièces perpendiculairement. On exécute des points qui remplacent les rivets.

Une solution légèrement différente est représentée sur la figure IV-82. Les bornes du secondaire sont reliées à deux électrodes juxtaposées. C'est une plaque de cuivre qui ferme le circuit en supportant la pression des électrodes et on exécute ainsi deux points à la fois.

On soude également par bossages (voir p. 266).

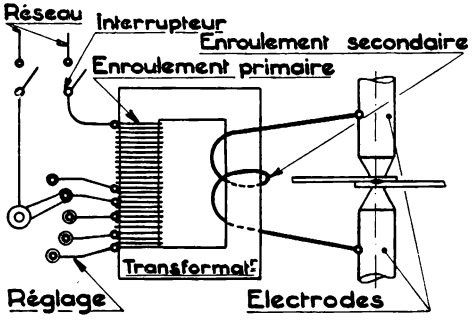



Fig. IV-81. — Schéma d'une machine de soudage par points.

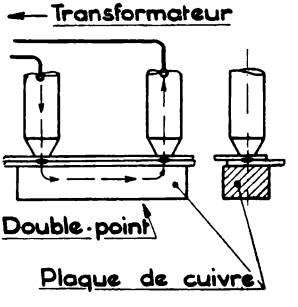



Fig. IV-82.

(1) La fusion n'intéresse qu'une zone très limitée.

***Soudage à la molette.*** — C'est une variante du soudage par points, les électrodes sont remplacées par des molettes (fig. IV-83).

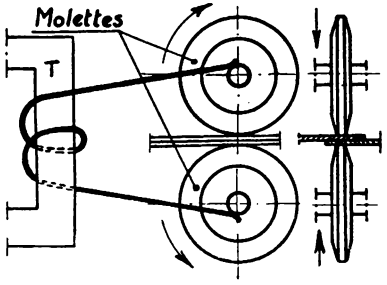



Fig. IV-83. — Schéma d'une machine à souder à molettes.

***Soudage en bout ou par rapprochement.*** — Les 2 pièces sont fixées solidement dans des mâchoires *M* reliées au transformateur (fig. IV-84). Le courant qui traverse les pièces dans le sens longitudinal chauffe les extrémités en *R* où la résistance électrique est maximale. On comprime dès que la température de soudage est atteinte. On soude par chauffage direct et surtout par étincelage.

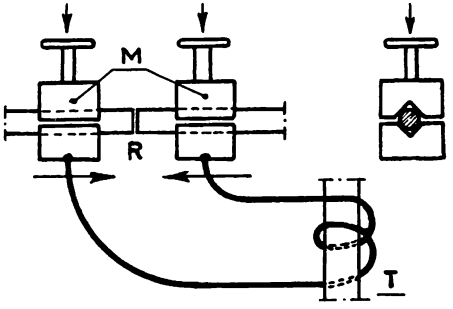



Fig. IV-84. — Schéma d'une machine à souder par rapprochement.

Les métaux en feuilles sont surtout assemblés par soudage par points et à la molette.

Les machines sont alimentées en courant alternatif monophasé. Aux bornes du secondaire du transformateur, le courant de soudage est de quelques volts seulement. Par contre l'intensité peut atteindre des dizaines de milliers d'ampères.

**Machines de soudage par points.** — On rencontre divers types de machines :

les machines fixes,
les presses à souder,
les machines mobiles ou suspendues,
les pinces de soudure,
les machines à électrodes multiples.

Toutes ces machines possèdent un transformateur abaisseur de tension, un commutateur de réglage qui fait varier la tension (et par suite l'intensité secondaire) et un interrupteur qui peut être direct, à fin de course, ou plus souvent automatique.

Les interrupteurs automatiques les plus simples — à temps constant — coupent le courant au bout d'un temps réglé à l'avance ; d'autres interviennent lorsqu'une quantité d'énergie déterminée a traversé la soudure. Mais on s'oriente de plus en plus vers l'utilisation des interrupteurs électroniques qui contrôlent avec une grande précision et beaucoup de sûreté l'échauffement du point de soudure pour des temps extrêmement courts (jusqu'à 1/100 de seconde). Les électrodes sont en cuivre et généralement de forme cylindrique ou conique. Mais la diversité des travaux à exécuter conduit à utiliser des électrodes de formes extrêmement variées (fig. IV-85). Une circulation d'eau refroidit les bras et les électrodes.

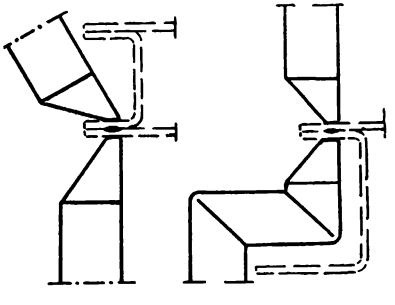


Fig. IV-85. — Électrodes de formes spéciales.

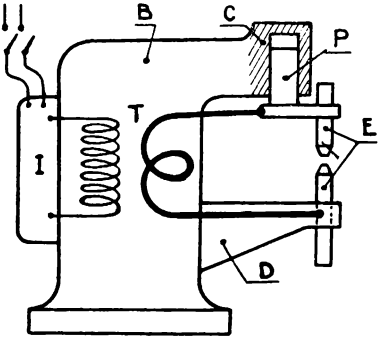



Fig. IV-86. — Schéma d'une machine fixe (soudage par points).

*Machines fixes* (fig. IV-86). — Les appareils de réglage et l'interrupteur *I* sont fixés sur le bâti *B*, à l'intérieur duquel est placé le transformateur *T*. Les électrodes *E* sont montées à l'extrémité de 2 bras,

dont l'un est fixe (le bras inférieur *D*) et l'autre mobile pour assurer la pression. Dans certains modèles, les 2 bras sont fixes et c'est l'électrode supérieure qui comprime les points de soudure par ses mouvements alternatifs de montée ou de descente.

*Les presses à souder* (voir soudage par bossages, page 266) se rangent dans cette catégorie.

***Machines mobiles ou suspendues.*** — Ces machines ressemblent beaucoup aux précédentes, mais elles sont plus légères (fig. IV-87).

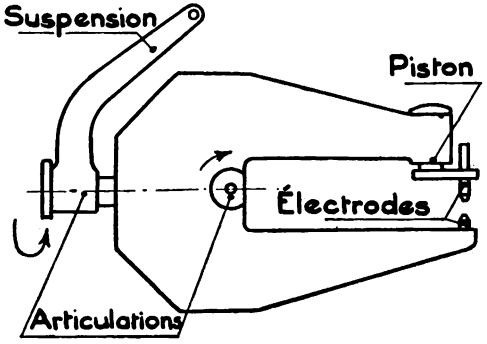



Fig. IV-87. — Schéma d'une machine suspendue.

Elles comportent un bâti en acier et un système d'accrochage permettant de les suspendre à un pont roulant ou à un palan et de les orienter dans toutes les directions. Leur forme rappelle celle des riveuses hydrauliques ou pneumatiques à pression avec un col de cygne profond. On les utilise pour le soudage des pièces lourdes et de grandes dimensions.

***Pinces de soudage.*** — Pour corriger le manque de maniabilité des machines précédentes, les constructeurs ont mis au point des pinces dans lesquelles les organes de soudage seuls sont mobiles (fig. IV-88). Le transformateur et les appareils de réglage sont fixes et reliés aux électrodes par des câbles souples. Le serrage des électrodes est pneumatique et l'interrupteur est automatique. La pince et les câbles sont refroidis par circulation d'eau. Les pinces sont presque toujours étudiées pour une fabrication déterminée.

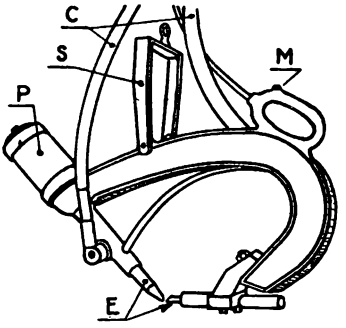



Fig. IV-88. — Pince de soudage (type Électromagnétique).
*E* : Électrodes. *P* : Piston. *C* : Câbles.
*S* : Suspension. *M* : Commande.

***Machines à électrodes multiples.*** — Des machines spéciales, étudiées pour les fabrications de série, possèdent un grand nombre d'électrodes (jusqu'à plusieurs centaines) et permettent de souder, en une seule opération, des ensembles bridés dans des montages.

Toutes les électrodes ne fonctionnent pas simultanément. Ceci provoquerait un trop gros appel de courant.

Un distributeur électrique automatique commande successivement les électrodes par petits groupes (plusieurs centaines de points en quelques dizaines de secondes).

**Méthode de soudage.** — Il n'y a pas à proprement parler de méthode de soudage ; la difficulté réside dans le réglage de la machine.

La qualité des points de soudure peut être influencée — pour un métal et une épaisseur donnés — par un grand nombre de facteurs variables : temps de soudage, intensité, diamètre des pointes d'électrodes, effort de compression, longueur et écartement des bras, état de surface des tôles, accostage des bords, chute de tension sur le réseau, etc.

L'intensité et le temps de soudage varient en sens inverse, mais il y a presque toujours avantage à réduire le temps en augmentant l'intensité. Cette solution a l'avantage d'être plus rapide, de réduire la consommation de courant, en limitant la zone chauffée, à la surface de contact *S* (fig. IV·89). Ceci diminue les déformations et permet d'utiliser des pressions plus élevées sans marquer l'empreinte de l'électrode dans la tôle. De plus les pointes d'électrodes chauffent moins et se détériorent moins vite qu'en soudage plus lent.

Avant soudage s'assurer que les pointes d'électrodes sont propres et au diamètre correspondant à l'épaisseur à souder ; nettoyer les surfaces et les faire coller parfaitement. Régler la pression et surveiller les chutes de tension éventuelles sur le réseau.

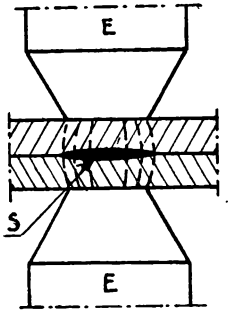



Fig. IV-89. — Point de soudure.

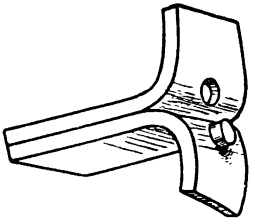


Fig. IV-90. — Point « déboutonné ».

De temps en temps, contrôler la qualité des points par des essais destructifs sur éprouvettes de même épaisseur. Le point doit se « déboutonner » et non se casser (fig. IV-90). Les constructeurs fournissent avec leurs machines des barèmes donnant toutes les indications pour les réglages. Les efforts de compression varient de quelques dizaines de daN à 10 000 daN (1) et plus ; les intensités secondaires peuvent aller de 200 à 300 A jusqu'à 50 000 A et plus (sous des tensions de quelques volts) et le temps de soudage varie de 1/100 de seconde à quelques secondes au maximum ; enfin, le diamètre des pointes d'électrodes se situe entre 4 et 20 mm suivant l'épaisseur.

Tous ces réglages peuvent être modifiés par la nature du métal ou de l'alliage à souder, par la section du profil, par la distance des points au bord de la tôle, etc.

Dans les petites machines, l'effort de compression est exercé à la main ou au pied, mais dans la plupart des cas, on utilise l'air comprimé ou l'huile sous pression (grosses machines) ou encore un système oléo-pneumatique.

Avec un interrupteur direct ou à fin de course, l'intensité est réglée de telle sorte que le temps de manœuvre de l'électrode est suffisant pour exécuter le point. Si l'interrupteur est automatique, après le

(1) En anciennes unités : « de quelques dizaines de kgf à 10 tonnes-f et plus ». En effet : 1 daN $\approx$ 1 kgf.

réglage, l'ouvrier n'a qu'à appuyer sur une pédale qui déclenche le cycle des opérations successives : pression pour accostage, enclenchement, et puis rupture du circuit électrique et enfin relevage des électrodes (fig. IV-91).

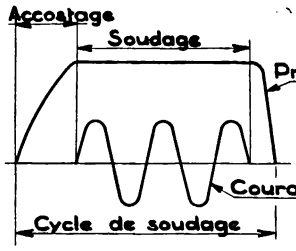



Fig. IV-91.

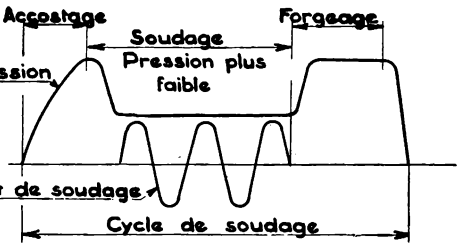



Fig. IV-92.

Pour certains métaux, l'effort de compression varie pendant l'exécution du point : pression élevée pour accostage, pression modérée pendant le passage du courant, puis pression élevée pour le forgeage (fig. IV-92).

Dans les machines modernes, ce sont des temporisateurs électroniques qui contrôlent avec une grande précision toutes ces opérations ou manœuvres, que l'on appelle « séquences » de soudage.

***Soudage par bossages.*** — Dans les travaux de série, on prépare, à la presse, l'une des pièces avec des bossages en nombre variable (fig. IV-93). Les deux pièces superposées sont placées sous une *presse à souder* qui est une machine fixe de soudage par points, plus puissante généralement et pourvue d'électrodes larges et planes. Le métal chauffe et se soude aux points de contact, sur les bossages seulement.

**Machine de soudage à la molette.** — L'appareillage est sensiblement le même que celui des machines fixes à souder par points. Les électrodes sont remplacées par des molettes qui, en tournant, entraînent les 2 tôles superposées ou encore par une molette qui roule sur un mandrin.

Les molettes ont une vitesse constante et le courant est envoyé par impulsions, soit d'une fraction de période pour les tôles de 1 mm maximum, soit par modulation réglable pour les tôles plus épaisses.

Les points sont plus ou moins espacés, ou ils se recouvrent partiellement ; dans ce dernier cas l'assemblage a toutes les qualités d'une soudure continue (fig. IV-94).

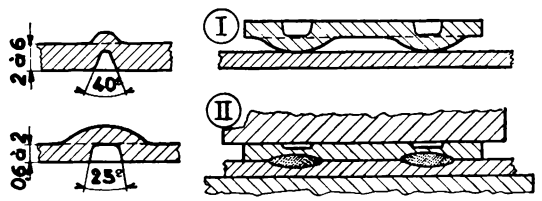



Fig. IV-93. — Soudage par bossages.

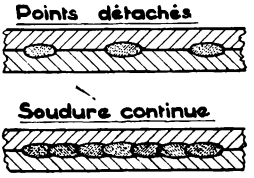



Fig. IV-94. — Soudage à la molette.

Suivant le type de fabrication, les molettes sont perpendiculaires ou parallèles aux bras de la machine. Avec la disposition de la figure IV-95, on peut souder des viroles en ceinture, et des tôles

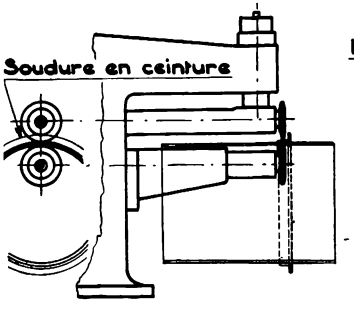



Fig. IV-95

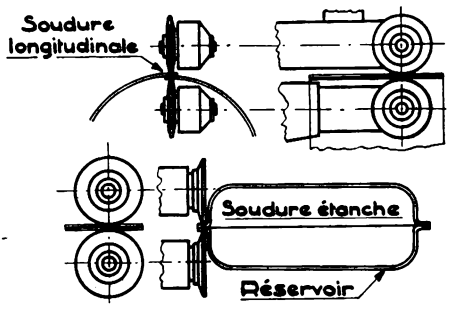



Fig. IV-96.

planes de grande longueur, mais de largeur limitée par la profondeur du col de cygne.

Les molettes placées dans l'autre sens (fig. IV-96) permettent de souder des viroles suivant une génératrice et des tôles de largeur illimitée (longueur tributaire du col de cygne).

Les réservoirs étanches sont souvent préparés et soudés comme l'indique la figure IV-96.

**Machines de soudage en bout ou par rapprochement.** — On retrouve dans ces machines le transformateur et les appareils de réglage et de contrôle des machines précédentes.

La capacité des machines est très variable : depuis quelques millimètres carrés jusqu'aux rails de chemin de fer.

Des mâchoires ou des montages de serrage, refroidis par circulation d'eau, remplacent les électrodes. Par le déplacement d'une de ces mâchoires, les deux bords sont mis en contact puis refoulés pour le soudage.

La commande peut être manuelle : levier ou volant agissant sur une crémaillère ou une vis. Dans les gros modèles c'est un piston actionné par de l'air comprimé, de l'eau ou de l'huile, qui assure le déplacement et le serrage.

***Méthode de chauffage direct.*** — Après accostage parfait des 2 pièces, on met les extrémités en contact et on fait passer le courant. Lorsque la température est suffisante au joint, on refoule en coupant le courant. La soudure prend la forme d'un bourrelet régulier (fig. IV-97). Cette méthode ne convient que pour les petites sections pleines et exige un ajustage parfait des extrémités, sinon le chauffage est irrégulier.

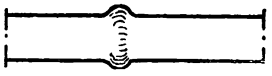


Fig. IV-97. — Bourrelet d'une soudure en bout par chauffage direct.

***Méthode de soudage par étincelage.*** — Lorsqu'il s'agit de souder des profilés, des tubes, des tôles sur une grande longueur, des profils avec des sections et des épaisseurs irrégulières, on soude par étincelage.

On règle l'intensité à une valeur plus élevée que par chauffage direct. Les bords sont mis en contact puis retirés légèrement. Il se produit entre les deux extrémités à souder un régime d'étincelles qui fond le métal aux points d'impact, et l'expulse violemment en fines particules incandescentes. Par une avance lente et régulière on maintient ce régime d'étincelles qui, au bout de peu de temps, intéresse toute la section et modèle les extrémités l'une sur l'autre en élevant progressivement la température. Lorsque celle-ci est suffisante on refoule énergiquement et on coupe le courant. Le bourrelet de soudure est moins important que par chauffage direct et plus irrégulier.

L'amorçage des étincelles exige parfois un préchauffage des extrémités à souder. Ce préchauffage est obtenu par contact direct.

# SOUDAGES HÉTÉROGÈNES

Le principe repose sur le phénomène d'accrochage superficiel (mouillage) appelé communément étamage dans le soudage à l'étain.

Si on chauffe une goutte d'étain sur une tôle non décapée, la goutte d'étain fond en conservant une forme sphérique, sans adhérer sur la tôle (fig. IV-98). En répétant la même expérience sur une tôle décapée fluxée (flux : voir paragraphe suivant), l'étain s'étale très largement et se lie parfaitement à la tôle : il y a « mouillage » (fig. IV-99). Quoique superficielle, la liaison est intime, avec diffusion de l'alliage de soudage dans le métal de base.

Fig. IV-98.

Fig. IV-99.

Fig. IV-100.

Comparé aux méthodes de soudage précédentes, on voit que le métal de base ne participe à l'assemblage que par sa surface et qu'il suffit de réchauffer la soudure pour séparer les 2 pièces et les retrouver comme avant soudage (à part la couche de soudure extrêmement mince qui ne peut être enlevée que par usinage).

En soudage à l'étain et en brasage, les 2 surfaces à réunir sont maintenues en contact parfait (jeu de 0,1 mm) et la soudure en fusion se répand entre les 2 bords par *capillarité* (fig. IV-100) ; par contre, dans le soudo-brasage, on apporte une grande quantité d'alliage de soudage en chanfrein ou en congé comme en soudage au chalumeau.

## SOUDAGE A L'ÉTAIN

L'alliage de soudage composé de plomb et d'étain fond vers 200 °C. On soude surtout par capillarité (voir fig. IV-33) et moins souvent avec apport important de soudure (à la lampe).

La résistance mécanique du joint est faible et on l'utilise surtout pour l'étanchéité d'assemblages agrafés ou rivés.

***Soudures et produits utilisés.*** — *Les soudures.* — Ce sont des alliages étain-plomb. Le plus employé est formé d'une partie d'étain pour 2 parties de plomb, et fond vers 220 °C. Pour les travaux de ferblanterie on utilise les soudures plus riches en étain : une partie d'étain pour une partie de plomb (fusion vers 200 °C).

*Décapants et flux.* — On appelle décapants les produits dont le rôle est de mettre à nu les surfaces, pour permettre l'accrochage de la soudure (acide chlorhydrique ou sulfurique étendu d'eau).

Les flux agissent pendant la soudure et facilitent la liaison, en prévenant la formation des oxydes, ou en les éliminant sous forme de scories (chlorure de zinc, résine, suif, pâtes, acide phosphorique pour les inoxydables).

**Soudage au fer.** — ***Outillage.*** — *Fers à souder.* — La partie essentielle d'un fer à souder est un morceau de cuivre tenu dans une monture en acier, terminée par une poignée en bois, pour les fers ordinaires. Les formes les plus courantes sont indiquées au croquis IV-101. On choisit le cuivre parce qu'il est très bon conducteur de la chaleur, parce qu'il s'étame facilement et aussi parce qu'il résiste bien à la corrosion.

La chaleur emmagasinée par la masse du cuivre est débitée rapidement au biseau qui se refroidit vite au contact de la pièce à souder.

On chauffe les fers à l'aide de flammes : aéro-gaz de ville, acétylénique, aéroacétylénique, propane. On utilise également les fers électriques dans lesquels le cuivre est entouré par des résistances électriques qui le maintiennent à la température convenable.

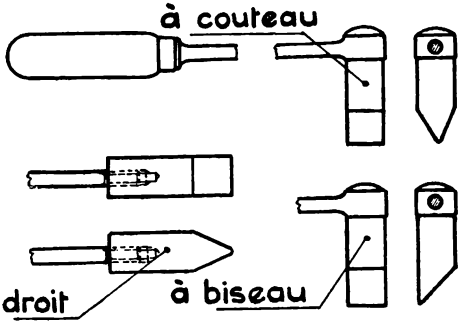



Fig. IV-101. — Fers à souder ordinaires.

Un *fer ne doit jamais rougir*, ce qui oxyde l'étain et attaque le cuivre. Avec un fer trop chaud, on fait une soudure qui n'est ni propre, ni solide.

*Il n'est pas possible de souder avec un fer qui n'est pas étamé.* — L'étamage est exécuté parfaitement sur du sel ammoniac ou dans du chlorure de zinc. Si le fer a été surchauffé, on remet le cuivre à nu par un léger coup de lime.

***Méthode de soudage.*** — *Préparation des pièces.* — On soude toujours à recouvrement pour augmenter la surface de liaison, et par suite, la résistance de l'assemblage. Largeur du recouvrement : 5 à 10 fois l'épaisseur.

Il est indispensable de décaper parfaitement les surfaces en contact. Ce décapage peut être exécuté mécaniquement à la lime, au grattoir, au sablon, au jet de sable, etc. (éviter la toile émeri). Chimiquement, on nettoie avec les acides, après un dégraissage à la potasse si les pièces sont grasses. Après décapage, on rince à l'eau courante et on sèche à la sciure de bois.

*Soudage proprement dit.* — Pour obtenir une liaison parfaite on étame à l'avance les surfaces qui seront en contact après soudage. *Ces surfaces doivent porter parfaitement.* La soudure ne remplit pas les vides et le métal ne peut être déposé qu'en couche très mince.

On incline la pièce pour que la soudure coule d'elle-même et se solidifie proprement (fig. IV-102). Pour la même raison, sur un cylindre on soude en descendant légèrement (fig. IV-103). On commence

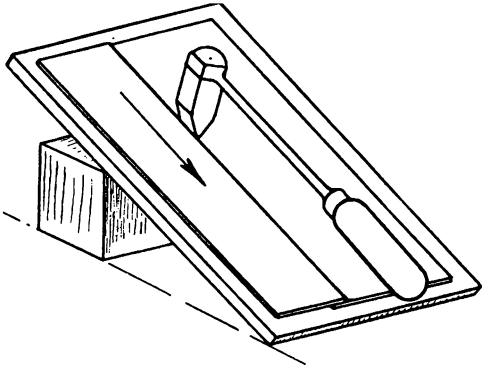


Fig. IV-102. — Soudage au fer. Position de la pièce et du fer. Sens d'avancement.

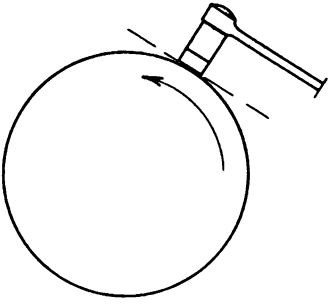


Fig. IV-103. — Soudage sur une viroie Position du fer.

par le haut en évitant de revenir en arrière, et on avance assez lentement pour obtenir un bon traversé. Un excès d'acide tache les tôles surtout le zinc. Après soudage, on rince à l'eau courante et on sèche à la sciure.

Il est possible de gratter ou de limer les soudures sur cuivre, laiton, zinc ou plomb, mais tout grattage doit être prohibé sur les tôles d'acier protégé : fer blanc, tôles galvanisées, tôles plombées.

## BRASAGE

C'est un soudage hétérogène, par capillarité, et chauffage indirect, réalisé à l'aide d'alliages de cuivre. Par addition de phosphore et d'argent notamment, on abaisse la température de fusion (600 °C mini.), et on augmente la fluidité, sans diminuer les caractéristiques mécaniques. La brasure est en baguettes, parfois en rubans, et une poudre décapante protège contre l'oxydation, et sert de fondant.

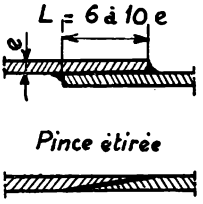



Fig. IV-104.
Préparation des bords.

*Préparation des bords.* — On brase toujours à recouvrement (fig. IV-104) et les bords sont *parfaitement* décapés et dégraissés.

Pour chauffer, on utilise les chalumeaux divers, ou mieux un four ou un inducteur, pour les petites pièces.

*Exécution.* — Le chauffage est indirect, et la flamme ne doit pas être dirigée vers la brasure, mais sur les pièces; le fil de brasure fond au contact de la pièce chaude. La très grande fluidité de la brasure (surtout à l'argent) assure un traversé parfait.

On assemble ainsi des pièces en acier inoxydable, en cuivre, en laiton, et ensemble, des métaux différents : acier sur cuivre, en tuyauterie notamment.

## SOUDO-BRASAGE

Le soudo-brasage est comparable au brasage par la nature de l'alliage et par le mécanisme d'accrochage (mouillage). Il se rapproche du soudage au chalumeau par l'outillage, la méthode et la quantité de métal déposé.

Sous l'action de la flamme du chalumeau, les brasures ordinaires donnent des dépôts remplis de soufflures et de piqûres. Ces défauts sont dus à la volatilisation du zinc. Par addition de silicium, on obtient des laitons qui ont une fusion tranquille, avec un minimum de volatilisation du zinc. Composition ≈ Cu 60, Zn 40, Si 0,2 %. Point de fusion 870 °C.

**Outillage.** — Le matériel courant de soudage oxy-acétylénique convient sans aucune modification. On choisit pour une même épaisseur, un chalumeau moins puissant (50 litres par millimètre d'épaisseur pour les aciers), et la flamme est réglée normalement.

Comme flux, on emploie généralement un mélange de borax et d'acide borique, et le métal d'apport est livré en baguettes d'un diamètre de 2 à 6 mm qui sont parfois enrobées de pâte décapante.

On peut aussi incorporer le flux dans la flamme. En traversant un appareil spécial l'acétylène se charge du flux gazeux qui ne laisse ni scories, ni laitier sur le cordon de soudo-brasure.

**Préparation des bords.** — Au-dessus de 4 mm on chanfreine en V suivant un angle de 80° ou en X pour les fortes épaisseurs (fig. IV-105). Les bords du chanfrein sont « blanchis » pour augmenter la surface d'accrochage et les angles sont arrondis. Le soin apporté au nettoyage des bords est une condition indispensable à la réussite.

Tous les procédés de décapage mécanique peuvent convenir : limage, grattage, meulage ou mieux sablage. Éviter, après décapage, le contact des mains ou d'outils gras ou malpropres.

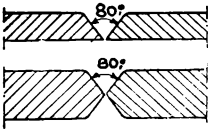



Fig. IV-105.
Préparation des bords.

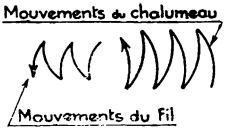



Fig. IV-106.

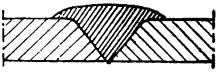


Fig. IV-107.

**Exécution.** — Avant de commencer le brasage, on mouille les bords à l'eau propre et on les recouvre de poudre décapante. On pointe si la ligne de brasure est longue.

L'opération de brasage est conduite à peu près de la même façon que le soudage au chalumeau, par la méthode à gauche généralement. Si le fil n'est pas enrobé, on le plonge de temps en temps dans la poudre, surtout aux reprises.

L'ouvrier habitué au soudage au chalumeau a tendance à surchauffer. Avec la flamme, il suffit de chauffer les bords à réunir à 850 °C (rouge cerise) pour les aciers et 880 °C pour le cuivre, pour obtenir l'accrochage du métal d'apport porté à fusion.

Le chalumeau et le fil sont animés de mouvements semi-circulaires (fig. IV-106). On peut faire les soudo-brasures en plusieurs passes ou en position (montantes, en corniche, au plafond). Pour les fortes épaisseurs, on dépose sur toute la surface des chanfreins, une légère couche de soudo-brasure (opération appelée « beurrage » et comparable à l'étamage), puis on remplit le chanfrein en plusieurs passes.

Sur acier, on laisse un renfort qui s'accroche sur les bords du chanfrein, pour augmenter la résistance de l'assemblage (fig. IV-107).

On peut également *soudo-braser les métaux légers* avec des alliages au silicium (AS 10), dont la température de fusion est inférieure à celle des pièces à réunir.

Après un décapage des bords, on chauffe avec une flamme douce (carburante) en apportant un flux abondant, et en évitant la surchauffe. Après le refroidissement, un lavage soigné est nécessaire pour éliminer toute trace de flux.

## ÉTUDE DES EFFETS DES CHAUFFAGES LOCALISÉS

Le soudage est un mode d'assemblage très pratique ; trop souvent des dessinateurs, non avertis, placent sur un ensemble, des soudures n'importe où, sans se soucier des conséquences de ces dispositions.

Pour utiliser rationnellement les procédés de soudage, il est indispensable de connaître parfaitement les propriétés des différents métaux et alliages, leur comportement au chauffage localisé dû au soudage et enfin il faut savoir prendre toutes les précautions nécessaires, afin d'éviter les effets toujours néfastes du retrait.

**Dilatation et retrait.** — ***Chauffage de toute la section d'une barre droite libre*** (fig. IV-108). — La barre s'allonge par dilatation de la zone chauffée. Au refroidissement elle retrouve sa longueur initiale et elle est restée droite.

***Chauffage local d'une barre droite*** (fig. IV-109). — La barre se cintre par déformation élastique sous l'action de la dilatation longitudinale du point chauffé *b.c* (II). Celui-ci se trouve comprimé par la résistance opposée par la section *a.b* qui est froide (dilatation entravée). Au-dessus de 600 °C, la zone chauffée *devenue très plastique* se refoule sous l'effort de compression et la barre est sensible-

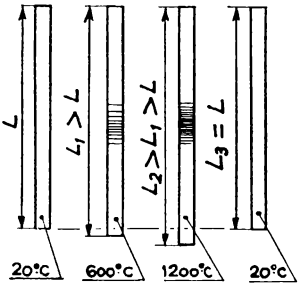



Fig. IV-108.

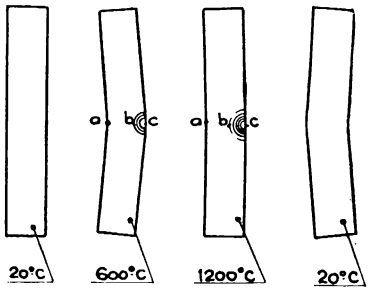



Fig. IV-109.

ment redressée par la libération des tensions (III). Au refroidissement, le point chauffé « prend son retrait » et cintre la barre en sens inverse (IV). Les phénomènes de dilatation et de retrait ne sont pas réversibles comme dans l'exemple précédent. Pourquoi ?

Au chauffage, lorsque la *température* et par suite l'*effort de compression* dans la zone *b.c* atteignent une valeur maximale, la *plasticité* du métal est également *maximale*, ce qui permet le refoulement du point chauffé. Au refroidissement, lorsque la *température* est *minimale*, l'*effort de traction* dû au retrait est *maximal*, mais la *plasticité* est *minimale* et le point refroidi ne peut pas s'allonger : dans ce cas, il déforme la barre.

C'est ce qu'on appelle l'*effet de chaude de retrait* que l'on retrouve dans toutes les soudures et dans tout chauffage local. Il s'ensuit que les soudures sont presque toujours des *zones tendues*, après refroidissement; elles sont soumises à des tensions internes.

***Chauffage local du bord d'une tôle*** (fig. IV-110). — La grande largeur de la tôle ne permet pas le cintrage comme figure IV-109.

*Tôles minces.* — Au chauffage, le bord se voile, ce qui atténue le refoulement et, par suite, l'effet de chaude de retrait. Il se forme néanmoins une « cloque » au voisinage du point chauffé.

*Tôles moyennes.* — La tôle est souvent détendue au milieu.

*Tôles épaisses.* — La tôle ne se déforme pas ou très peu et le retrait laisse, dans la zone chauffée, des efforts latents de traction appelés *contraintes résiduelles (ou tensions internes).*

***Soudage de deux barres libres*** de longueur $L$ avec un jeu $j$ (fig. IV-111). Par le chauffage les extrémités se sont allongées ; $l_1 > l$ mais $j_1 < j$ (II). Au moment du soudage $L$ n'a pas varié (III) : au refroidissement par le retrait : $L_1 < L$ (IV). Si les barres faisaient partie d'un ensemble, la soudure serait soumise à un effort de traction.

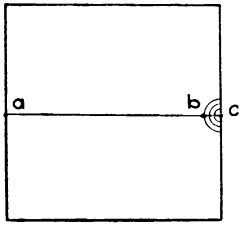



Fig. IV-110.

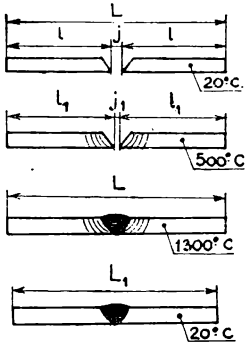



Fig. IV-111.

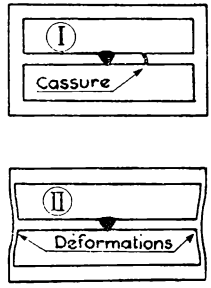



Fig. IV-112.

*1er cas. L'ensemble est rigide* (fig. IV-112). — La soudure peut casser (métaux fragiles) ou bien présenter des tensions (I).

*2e cas. L'ensemble n'est pas rigide.* — Le retrait déforme le cadre (II).

***Soudage en chanfrein et en angle intérieur.*** — Le retrait plus important dessus, cintre la pièce (fig. IV-113). Cette déformation qui se retrouve dans les soudures d'angle (fig. IV-114) est plus marquée dans les soudures en plusieurs passes.

*Conclusion.* Les soudures sont, presque toujours, des chauffages localisés, avec dilation et retrait plus ou moins entravés. Après refroidissement, il existe dans les zones chauffées *des tensions* qui peuvent :

1° *Subsister en totalité* : pièces épaisses ou bridées, qui peuvent casser au refroidissement, ou en service sous de faibles efforts.

2° *Se libérer partiellement ou en totalité* : soit par *écoulement de métal à froid* (métaux de grand allongement et de grande résilience), soit par *déformation de la pièce* (tôles minces ou moyennes, tubes, profilés).

3° *Se libérer totalement par cassure* (métaux fragiles).

*Attention* : Les déformations sont une forme de libération des tensions; par suite en *s'opposant aux déformations, on augmente la valeur des tensions*, et en corrigeant les déformations (martelage, dressage à la presse, chaudes de retrait, etc., *on crée de nouvelles tensions.*

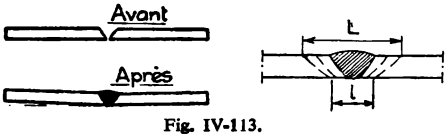



Fig. IV-113.

Fig. IV-114.

## REMÈDES AUX EFFETS DE CHAUDE DE RETRAIT

**Avant soudage.** — ***Étude de la position des soudures :*** les situer dans les zones élastiques et déformables (ou prévoir des zones élastiques à leur voisinage, fig. IV-115 à IV-121). Éviter les soudures dans les surfaces planes et dans les angles vifs. Les dispositions conseillées ont l'avantage de permettre pour les tôles minces le martelage à froid, après soudage.

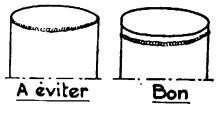



Fig. IV-115.

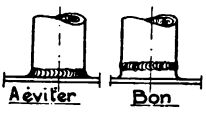



Fig. IV-116.

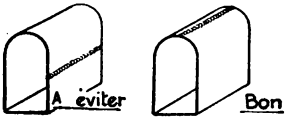



Fig. IV-117.

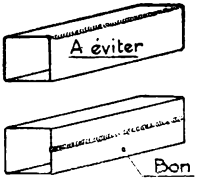



Fig. IV-118.

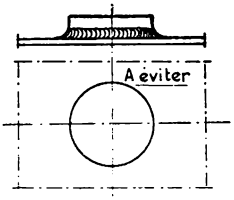



Fig. IV-119.

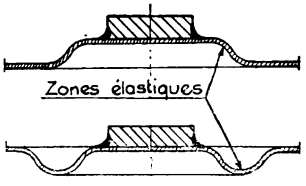



Fig. IV-120.

***Disposition symétrique des soudures*** pour équilibrer les tensions et les déformations (fig. IV-122 et IV-123). Moins de mise en forme ; pas de déformations, mais soudures plus longues.

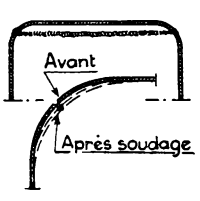



Fig. IV-121.

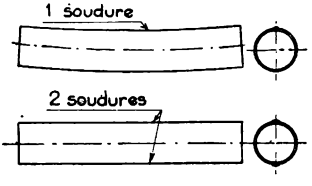



Fig. IV-122.

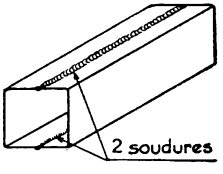



Fig. IV-123.

***Ajustage parfait des bords.*** — Le retrait, plus important aux endroits où les bords ne portent pas, provoque des déformations (fig. IV-124 et IV-125).

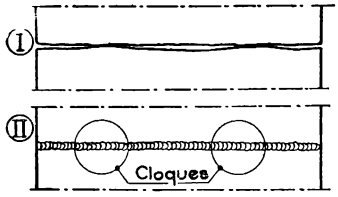



Fig. IV-124.

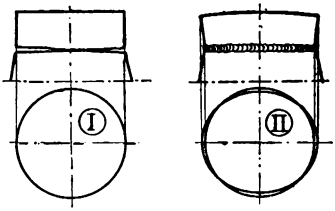



Fig. IV-125.

***Positionnement des pièces avant soudage.*** — Écarter les bords en V (fig. IV-126) si on ne pointe pas. Pour les soudures d'angles, ouvrir l'angle, si on soude de l'extérieur vers l'intérieur, ou le fermer si on soude en sens inverse (fig. IV-127). Les figures IV-128 et IV-129 indiquent la position des pièces épaisses avant soudage pour obtenir une pièce plane ou un angle de 90°.

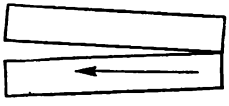


Fig. IV-126.

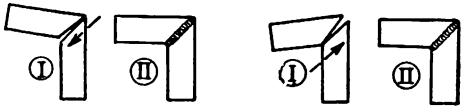



Fig. IV-127.

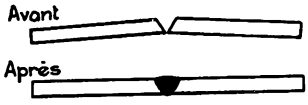



Fig. IV-128.

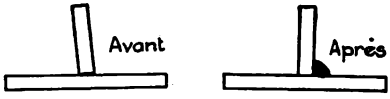



Fig. IV-129.

***Déformations préalables.*** — On exécute à l'avance une déformation inverse de celle que produira le retrait.

Un collet soudé est plus fermé à l'avance, si la soudure est à l'extérieur (fig. IV-130) ; par contre, il est plus ouvert lorsque la soudure est à l'intérieur (fig. IV-131). Une plaque présentant une soudure en son milieu est légèrement emboutie à l'avance (fig. IV-133) et dans une soudure en T, la pièce inférieure est cintrée comme l'indique la figure IV-134 ; le retrait les redressera. On évase légèrement les bords d'une virole en tôle mince (fig. IV-135).

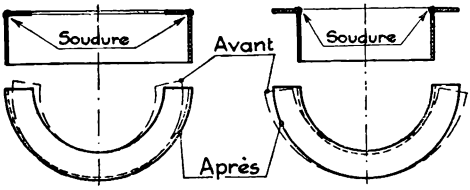



Fig. IV-130.



Fig. IV-131.

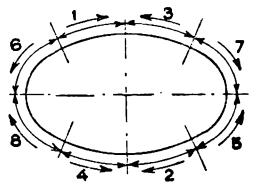



Fig. IV-132.

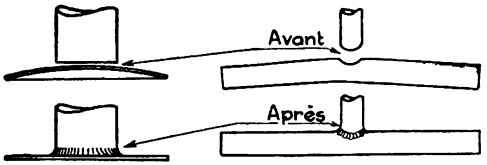



Fig. IV-133.



Fig. IV-134.

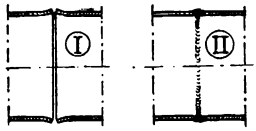



Fig. IV-135.

***Préchauffage*** avant soudage, entre 100 et400 °C : *évite la localisation* des tensions, et diminue leur valeur dans la soudure même, en les répartissant sur une plus grande surface.

**Pendant le soudage.** — On accorde de plus en plus d'importance à ce qu'on appelle les séquences de soudage, c'est-à-dire l'ordre d'exécution des soudures, des différentes portions de soudures et aussi des différentes passes dans les soudures en plusieurs passes.

***Règle.*** — Chaque fois que c'est possible, on s'efforce de commencer au milieu en laissant aux extrémités la possibilité de se déformer sous l'action de la dilatation et du retrait. Puis on soude symétriquement de part et d'autre du milieu, pour équilibrer les déformations.

***Tôles.*** — *Souder de préférence sans pointer* en utilisant des outillages de guidage des bords.

*Si on est obligé de pointer : Ne jamais pointer* en premier *les extrémités* (fig. IV-136) mais *pointer au milieu* en « croquant » les bords, tôles minces (fig. IV-137), puis de part et d'autre du milieu

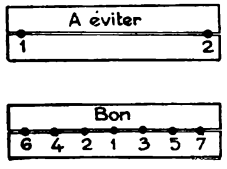



Fig. IV-136.

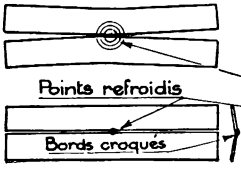



Fig. IV-137.

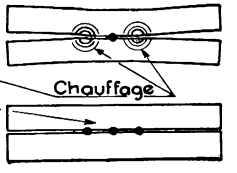



Fig. IV-138.

(fig. IV-138). Les extrémités peuvent se déformer librement et on martèle les points, à froid, si les bords se chevauchent sous l'effet de chaude de retrait des points.

Souder par portions symétriques pour équilibrer les effets du retrait (fig. IV-132) ; pour les soudures à l'arc multipasses en X, exécuter des passes symétriques (fig. IV-139 et IV-140).

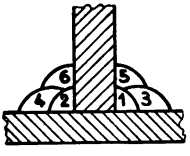



Fig. IV-139.

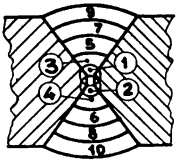



Fig. IV-140.

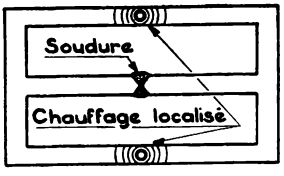



Fig. IV-141.

***Barre bridée.*** — On peut chauffer l'ensemble et souder à chaud, ou chauffer localement comme figure IV-141.

***Ensembles métalliques*** (tôles pliées, tubes ou profilés). — La figure IV-142 donne le schéma d'un ensemble soudé avec l'ordre d'exécution des soudures qui sont *commencées au milieu.* Laisser refroidir les soudures pour corriger les déformations dues au retrait avant de passer aux soudures suivantes. On pourrait déformer les barres à l'avance en sens inverse ou redresser aussitôt par chauffage total ou symétrique (voir fig. IV-143 et IV-144).

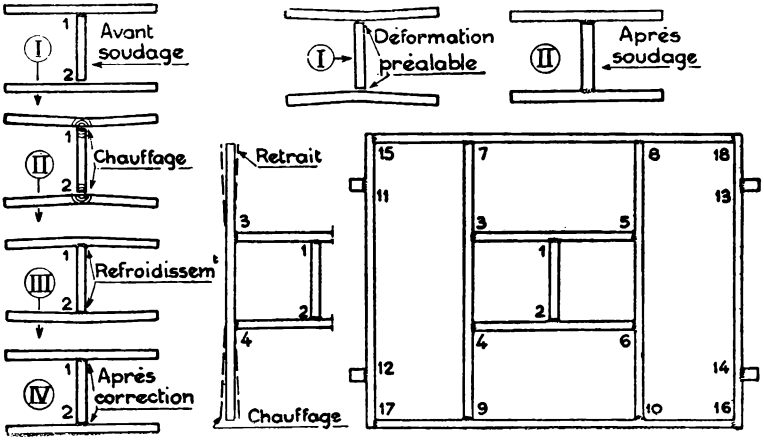



Fig. IV-142.

**Après soudage.** — ***Martelage à froid*** des zones tendues dans la soudure (tôles minces et moyennes).

***Chaudes de retrait*** dans les zones détendues. Espacer régulièrement et attendre le refroidissement complet avant de juger du résultat (fig. IV-145).

***Chauffage local*** symétrique de la soudure (fig. IV-143).

***Chauffage total*** de toute la section et correction à chaud de la déformation (fig. IV-144).

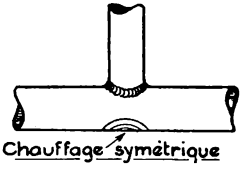



Fig. IV-143.

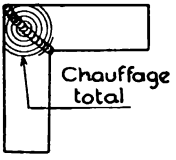



Fig. IV-144.

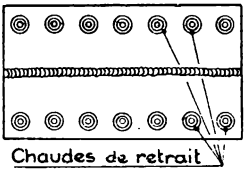



Fig. IV-145.

*Traitement de détente.* Par un chauffage — à température variable, suivant la nature du métal — d'une large zone autour de la soudure, ou de tout l'ensemble, *on fait disparaître toutes les tensions* (contraintes résiduelles), ce qui provoque parfois des déformations (voir p. 30). Ces tensions sont dangereuses — surtout si elles s'exercent dans le même sens que l'effort supporté par la pièce en service — et d'autant plus qu'elles sont très difficiles à déceler.

Le chauffage est exécuté, soit dans des fours de grandes dimensions, soit à l'aide d'installations volantes, montées autour de la zone à recuire et chauffées au gaz ou par induction.

**Défauts des soudures.** — Les 2 plus gros défauts des soudures sont le manque de pénétration et le collage (fig. IV-146). Le manque de pénétration (II) qui peut avoir pour causes, l'utilisation d'un chalumeau trop faible, ou une intensité insuffisante, ou une avance

Fig. IV-146.

trop rapide, ou l'inexpérience du soudeur, a le grave inconvénient de laisser subsister sur l'envers de la soudure une amorce de cassure qui se prolongera dans la partie saine du métal fondu, si la pièce est soumise à des efforts de flexion (III). Une bonne soudure doit présenter sur l'envers un cordon de gouttelettes (I).

Le collage (IV) est causé par le dépôt de métal fondu sur une surface qui n'a pas été portée à la température de fusion. Tout comme le manque de pénétration, le collage joue le rôle d'amorce de cassure.

D'autres défauts moins graves, mais courants (fig. IV-147), sont

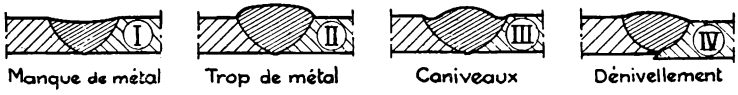



Fig. IV-147.

l'insuffisance d'apport de métal (I), l'excès d'apport de métal (II), les caniveaux (III) et la dénivellation des bords (IV). Un chalumeau mal réglé provoque l'oxydation (excès d'oxygène) ou la carburation (excès d'acétylène).

C'est par une très grande régularité de l'avance, des mouvements du chalumeau, du fil ou de l'électrode, que l'on obtient un dépôt uniforme.

On n'envisagera pas ici les défauts imputables au manque de soudabilité du métal de base : fragilité, porosités, modifications de la structure et des propriétés mécaniques, diminution de la résistance à l'oxydation et aux corrosions, etc.

On pourrait ajouter aussi les défauts dus à une mauvaise disposition des soudures ou à un ordre d'exécution mal établi.

**Contrôle et essais avant soudage.** — ***Contrôle de la soudabilité.*** — Par *analyse chimique* (teneurs, présence d'impuretés, d'oxyde, etc.). Par des *essais mécaniques* classiques et des essais spéciaux — sur éprouvettes, sans soudure, et sur éprouvettes soudées — qui ont pour but de s'assurer que les caractéristiques mécaniques du joint soudé, sont au moins égales à celles du métal de base.

Toutefois, certains aciers, non alliés, qui donnent aux essais mécaniques des résultats très satisfaisants, sont parfois cause de ruptures graves en service (des navires se sont coupés en deux par grosse mer). Ces accidents sont provoqués par des *ruptures fragiles* ou par le *vieillissement.*

***Ruptures fragiles.*** — On désigne ainsi des cassures brutales, sans allongement, qui se produisent sous des efforts très faibles, par *basses températures*, dans des constructions qui avaient, auparavant, donné toute satisfaction à des températures au-dessus de 0 °C.

Ces accidents sont imputables aux aciers contenant de l'oxygène, et appelés aciers *effervescents* (voir p. 10) surtout sur des *tôles épaisses* au voisinage de *soudures bridées* (contraintes résiduelles élevées), et à partir d'*angles vifs* ou d'*amorces de cassures.*

*Remèdes.* — Pour les pièces soumises à des contraintes sévères, choisir des aciers sans oxygène (*aciers calmés* qualité 3 et 4 et dont la *température de transition* est nettement *inférieure* à la température d'utilisation (voir p. 13 et 14).

*Réduire* les *contraintes résiduelles* par la position et l'ordre d'exécution des soudures, ou *les supprimer* — si possible — par un traitement de détente.

*Surveiller le tracé* des pièces soudées, en évitant les changements brusques de section, les angles vifs, etc.

*Utiliser des électrodes basiques.*

***Sensibilité au vieillissement.*** — Après un écrouissage modéré (à partir de 10 %), fréquemment dépassé dans le travail de mise en forme, certains aciers voient leur résilience diminuer très sérieusement dans le temps, à la température ambiante ; c'est le vieillissement qui peut être accéléré par un chauffage à 200-300 °C. On attribue ce phénomène à la présence d'azote dans l'acier.

*Remèdes : essais avant soudage.* — Faire un essai de résilience sur le métal recuit ; puis écrouir de nouvelles éprouvettes à 10 % minimum et les chauffer à 250 °C pendant 1/2 heure. Comparer les résultats ; si la résilience a baissé sensiblement, l'acier est sensible au vieillissement : choisir une qualité d'acier qui ne présente pas cet inconvénient.

***Autres contrôles :***

*Contrôle de la qualification de la main-d'œuvre :* essais professionnels à l'embauche, puis périodiques sur éprouvettes soumises à des essais destructifs.

*Surveillance et entretien des appareils* et de l'outillage.

*Contrôle de la qualité des métaux et produits d'apport :* fil d'apport, électrodes, etc.

*Étude des constructions soudées :* tracé des formes, choix du procédé de soudage, position des soudures, forme des chanfreins, ordre d'exécution préétabli.

*Traitements préalables :* décapage, préchauffage, etc.

*Positionnement :* choix des montages et positionneurs.

**Contrôle pendant le soudage.** — *Réglage des appareils :* pression, débit, intensité, etc.

*Mode opératoire approprié.*

*Surveillance des soudeurs.*

**Contrôle après soudage.** — ***Essais destructifs.*** — Dans les séries (pièces moyennes ou petites), on choisit par lots, au hasard, une ou plusieurs pièces que l'on soumet à des efforts statiques ou dynamiques élevés jusqu'à destruction : réservoirs soumis à la pression hydraulique jusqu'à éclatement, poutres chargées jusqu'à flexion ou rupture, etc. Ces essais peuvent être exécutés soit à la température ambiante, soit à haute température, soit à basse température.

***Essais semi-destructifs.*** — Les essais précédents ne sont pas applicables aux grands ensembles, aux pièces coûteuses ou uniques. Dans ce cas, on exécute, sur des éprouvettes de même métal, des soudures, en se plaçant dans les mêmes conditions d'exécution que pour la pièce à contrôler, puis on fait, sur ces éprouvettes, des essais destructifs.

*Pliage* sur l'envers et sur l'endroit de la soudure (fig. IV-148 et IV-149) en V ou à bloc (tôles minces), sur mandrin (tôles épaisses).

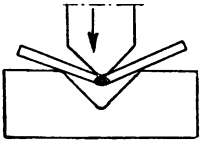


Fig. IV-148.

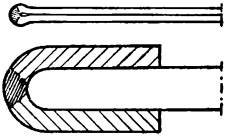


Fig. IV-149.

Fig. IV-150.

Pour aciers trempants, *essais de dureté Vickers* sur soudures coupées transversalement (fig. IV-150). Il ne doit pas y avoir de grosses différences de dureté entre le métal de base, le métal fondu et surtout la zone de liaison. Si celle-ci est plus dure, prévoir un préchauffage et un postchauffage, et même, un soudage à chaud qui évitent le refroidissement brutal (voir p. 30)

*Essais de résilience*, de fatigue, de sensibilité à l'effet d'entaille et à la fissilité (soudage à l'arc).

Examen du grain de la cassure.

Examens macrographique et micrographique sur soudure coupée transversalement et polie ; les constituants et leur répartition sont mis en évidence par l'attaque d'un réactif.

***Essais non destructifs.*** — Examen *radiographique* ou *gammagraphique*. Un film est collé sur la soudure, puis on l'expose, sur la face opposée, à une source de rayons X, ou à une source radioactive (rayons gamma). Les collages, le manque de pénétration, les inclusions, soufflures, etc. apparaissent sur le film et on fait la réparation, après gougeage de la partie qui n'est pas saine.

On utilise aussi *les ultra-sons* (ondes sonores de haute fréquence). Les défauts perturbent la propagation de ces ondes à travers le métal, et les variations sont enregistrées par un oscillographe cathodique, ce qui permet de localiser et d'identifier les défauts.

Toutefois, l'interprétation des clichés radio ou gamma, d'une part, et des oscillogrammes d'ultra-sons, d'autre part, est souvent délicate. Lorsqu'on peut les utiliser conjointement, ces deux types d'essais se complètent heureusement.

*Essais statiques* des ensembles par charges (ponts, poutres, cellules d'avions, pylônes, etc.) et *essais à la pression hydraulique* de réservoirs étanches avec, dans tous les cas, mesure des flèches et déformations.

*Ressuage.* — On passe sur la ligne de soudure, du rouge organol qui, après pénétration, est essuyé parfaitement ; la soudure est ensuite badigeonnée avec un révélateur (talc, blanc de traceur) : le rouge « ressue » aux endroits des criques, fissures, porosités, etc.

Au lieu de rouge organol, on peut utiliser de la même façon, un liquide qui est ensuite éclairé en lumière ultra-violette *(fluorescence)*, ce qui fait apparaître les défauts en jaune, sur fond noir.

Par ces procédés, on décèle également les pailles ou dédoublements des tôles, sur les chanfreins, avant soudage.

Ne conviennent que pour les défauts débouchant en surface.

***Essais d'étanchéité*** (applicables aussi aux réservoirs rivés ou agrafés).

RÉSERVOIRS OUVERTS de grandes dimensions, difficiles à fermer.

On peut simplement enduire un côté avec du blanc de traceur, laisser sécher, et passer sur la face opposée du pétrole, qui ressortira

par la moindre fissure sous forme d'auréoles dans le blanc. Comme pour le ressuage on trouve des produits, beaucoup plus pratiques, en aérosols : rouge organol et blanc révélateur.

RÉSERVOIRS ET INSTALLATIONS FERMÉS. — *Essai hydraulique* (analogue à l'essai du service des Mines). Après avoir obturé les orifices avec des bouchons, ou des joints pleins, on remplit d'eau, et à l'aide d'une pompe d'épreuve, on met l'appareil en pression ce qui permet de déceler les fuites rapidement.

*Essais à l'air.* — Cet essai présente des dangers d'explosion, par détente brutale de l'air, en cas de rupture; on l'exécute à une pression très inférieure à la pression d'utilisation, (0,2 à 0,3 bar) ou dans un puits, pour éviter les accidents.

Remplies d'air à basse pression, les *petites pièces* sont plongées dans un bassin rempli d'eau, et la moindre fuite se trahit par des bulles d'air; sur les *grands ensembles*, les soudures sont badigeonnées au pinceau, avec de l'eau de savon, ou on fait des *essais de longue durée :* l'installation remplie d'air est maintenue sous faible pression pendant 24 h et plus. Les fuites qui se traduisent par une chute de pression au manomètre, sont décelées, ensuite, à l'eau de savon.

MÉTAUX NON FERREUX ET FABRICATIONS SOIGNÉES. — Sur les soudures, on colle, avec du scotch, des bandes de papier spécial et de couleur jaune, puis, après un vide poussé à l'intérieur, le réservoir est mis en légère surpression, avec du gaz ammoniac qui teinte les bandes jaunes en bleu, à l'endroit des fuites.

Après l'essai, on doit faire un ou plusieurs balayages avec un gaz neutre (azote) pour éviter la formation de mélanges détonants.

Pour les produits dangereux (produits toxiques ou radio-actifs), on fait des *essais à l'hélium.* Après un vide très poussé, on remplit le réservoir d'hélium, gaz particulièrement filtrant. Puis on passe sur les soudures un « reniflard » (petit aspirateur) relié à des appareils très sensibles à la moindre trace d'hélium; ceci permet de déceler les fuites les plus imperceptibles.

## COLLAGE DES ALLIAGES LÉGERS

Aux procédés d'assemblage, il convient d'ajouter le collage des métaux qui s'applique surtout aux alliages légers.

Les colles, mélanges de dérivés du caoutchouc, de résines synthé-

tiques, et de divers produits complexes, sont appliquées liquides et elles sont solidifiées, soit à la température ambiante, soit par une cuisson — en dessous de 200 °C — accompagnée, le plus souvent, de pression sur le joint.

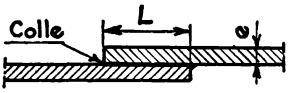



Fig. IV-151. — Recouvrement d'un joint collé.

Les bords préparés à recouvrement — dont la largeur varie de 15 à 100 fois l'épaisseur de la tôle — sont dégraissés et grattés soigneusement (fig. IV-151).

Le collage exige des installations coûteuses pour l'application simultanée de la pression et de la température, ce qui en limite les applications : carrosserie, mobilier (collage bois-métal et bois-caoutchouc).

CHAPITRE V

# OPÉRATIONS DE FINITION

## BORDAGE

Le bordage a pour but de donner de la rigidité aux bords des objets fabriqués en tôles minces, jusqu'à 1,5 mm.

On roule la tôle sur un fil d'acier qui reste généralement dans le bordé, mais qui peut être retiré pour les gros diamètres (gouttières).

On borde les tôles planes en ligne droite ou suivant un profil quelconque. Sur les pièces cylindriques ou coniques, les bordés sont dits en cordon, ou en suage (fig. V-1).

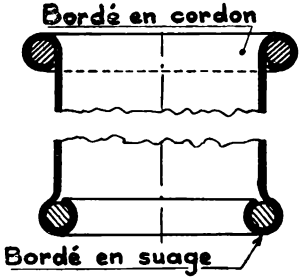



Fig. V-1.

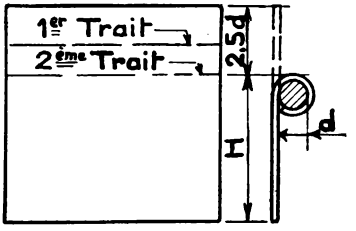



Fig. V-2.

Selon la forme du bordé — droit ou cintré — ou le diamètre de la virole — bordés en cordon ou en suage — le diamètre du fil peut varier dans d'assez larges proportions. A titre indicatif : tôle de 0,5 mm : fil de 1,5 à 8 mm, tôle de 0,8 mm : fil de 2 à 14 mm, tôle de 1 mm : fil de 3 à 16 mm, tôle de 1,5 mm : fil de 4 à 20 mm.

On borde sur du fil clair (fil écroui) plus rigide et plus résistant que le fil recuit.

**Traçage des bords.** — En règle générale, on ajoute, à la hauteur totale *H*, bord compris, 2,5 fois le diamètre du fil (fig. V-2 et V-3). Le bord ainsi tracé est un peu faible — on devrait prendre 2,5 $d + e$ — mais il vaut mieux un bord un peu trop court qu'un peu trop long.

Pour border à l'extérieur une coupe circulaire, sur une tôle plane, on ajoute 2 *d* seulement ; le bord s'allonge pendant la rétreinte.

## BORDAGE A LA MAIN

***Bordés droits.*** — Deux traits sont tracés au compas (fig. V-2), l'un à 2,5 *d* du bord (2e trait), l'autre au milieu de cette distance (1er trait). Pour les petits diamètres, le bordé est préparé sur une tranche « à border » (fig. V-3).

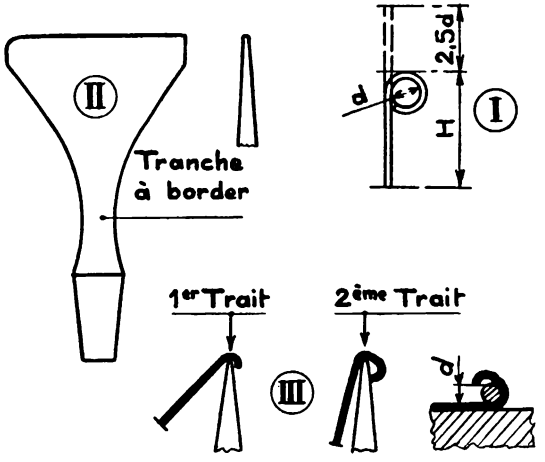



Fig. V-3.

A la batte en bois, ou au maillet, on plie suivant le 1er trait, à la forme d'un crochet fermé (III). Le même travail est exécuté ensuite suivant le 2e trait de telle sorte qu'il reste juste le passage du fil (III).

Celui-ci est présenté et il suffit d'un coup de maillet pour l'enfermer (fig. V-4). Le serrage est obtenu comme l'indique le croquis II.

Il est préférable de préparer le bord trop court que trop long ; en effet, il est facile de rouler un bord un peu court en frappant à défaut (III). Cette opération serre bien la tôle sur le fil ; au contraire,

un bord trop long s'arrondit mal et se desserre si on le déroule (IV).

On cintre le fil pour le faire porter facilement au fond du pli de la tôle (fig. V-5). Un cintrage du fil en sens inverse est une gêne pour la fermeture du bordé.

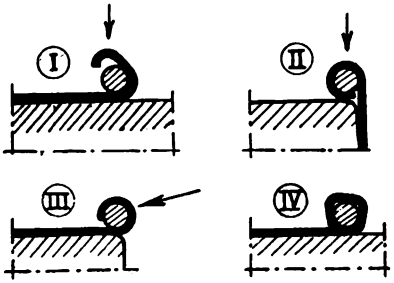



Fig. V-4. — I. Fermeture. — II. Serrage. — III. Pour rouler davantage. IV. Bord trop long.

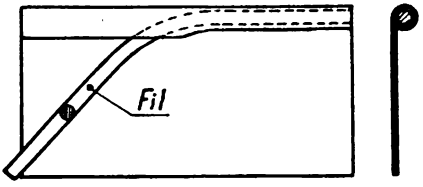



Fig. V-5. — Cintrage du fil.

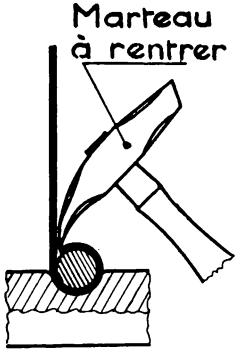



Fig. V-6.

On exécute les bordés de gros diamètre de la même façon sur des outils présentant un rayon plus faible que celui du fil. Pour le serrage, on utilise un marteau « à rentrer », en faisant porter le bordé dans un outil appelé suage (fig. V-24) ou une étampe (fig. V-6).

Pour faire un bordé creux, il suffit de retirer le fil après un serrage modéré de la tôle.

***Bordés circulaires sur tôles planes*** (fig. V-7). — *Bordés intérieurs* (I). — Le bordé est formé par allongement du bord, sauf vers la fin du travail. On étire le bord comme un collet, et on le rabat

sur une tranche ou un outil de forme, suivant le même principe que pour les bordés droits. Puis le fil est serré au maillet et au marteau à rentrer.

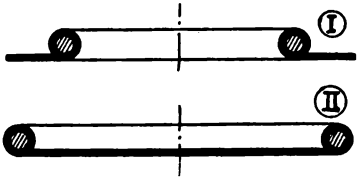



Fig. V-7. — Bordés intérieur et extérieur sur tôle plane.

*Bordés extérieurs* (II). — A l'inverse des précédents, la préparation se fait par rétreinte presque uniquement. Sur un tas de forme ou sur un bordoir, on rétreint le bord (fig. V-8) qui n'a pour largeur que 2 *d*. Il faut une tranche cintrée pour rouler le bord en crochet (fig. V-9). L'exécution de ce petit bord roulé est indispensable pour prévenir la formation de plis trop marqués. Par une 2e passe au fond du pli on ferme le bord avant de mettre le fil en place. On serre le fil sur un bordoir (fig. V-8) ou au marteau à rentrer.

S'il se forme des plis pendant la rétreinte, on doit s'attacher à les régulariser et à les faire disparaître dès qu'ils apparaissent par planage sur un tas de forme puis, pour finir, sur le fil même.

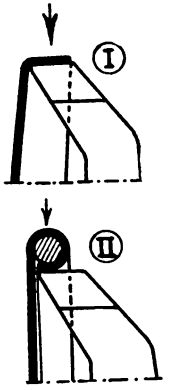



Fig. V-8.
Bordé circulaire.
I. — Rétreinte du bord.
II. — Serrage du fil.

***Bordés sur viroles.*** — Lorsque le bord est roulé à l'extérieur il prend le nom de bordé en cordon et on appelle bordé en suage le bordé roulé à l'intérieur (fig. V-1). Ces bordés peuvent être préparés avant cintrage. Si la virole est cylindrique on exécute à plat un bordé droit (fig. V-10). Pour

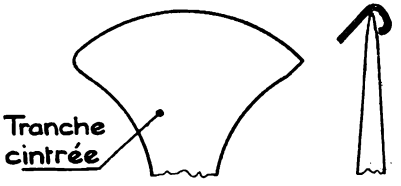



Fig. V-9.

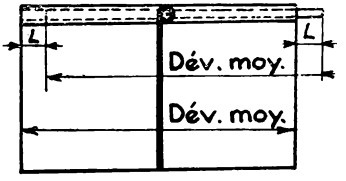



Fig. V-10. — Cylindre bordé avant cintrage.

les troncs de cône il faut border suivant un arc de cercle à l'intérieur ou à l'extérieur comme il a été vu précédemment.

Le fil coupé de la longueur exacte du développé de la tôle est décalé de quelques centimètres ($L$) pour que le joint du fil ne soit pas situé sur la soudure ou sur la ligne de joint (fig. V-11). On cintre

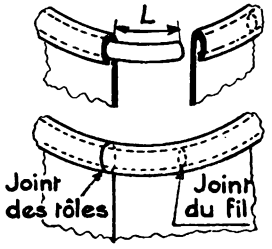



Fig. V-11.

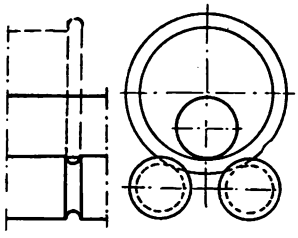


Fig. V-12. — Cintrage à la machine d'un cylindre bordé.

après bordage en utilisant des gorges qui existent dans les rouleaux des machines à cintrer (fig. V-12). Malgré cette précaution, on ne peut pas éviter une déformation au voisinage du bordé : on dit que le bordé « talonne ».

Pour supprimer cette déformation, il faut exécuter le bordé après cintrage. On évase le bord à 45° environ par étirage, puis on roule comme un bordé droit sur une tranche à border ou un tas arrondi (fig. V-13). Il est nécessaire de rouler le bord un peu plus large (3 $d$ environ) pour pouvoir supprimer au maillet le talon marqué par la tranche (fig. V-13 et V-14).

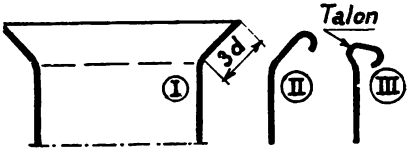



Fig. V-13. — Bordage d'un cylindre après cintrage.

Avec un fil de gros diamètre il se forme des plis qu'il faut rétreindre dès qu'ils se manifestent sur un tas et sur le fil pour finir.

Le joint du fil doit être bien ajusté et situé à quelques centimètres du joint de la tôle. Le bordé est arrondi sur une bigorne ou mieux sur un cône

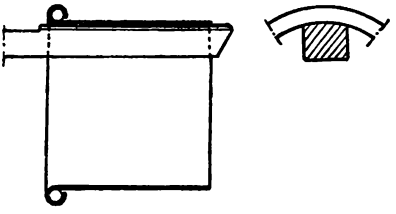


Fig. V-14. — Pour serrer et supprimer le talon.

et dressé sur un marbre au marteau à rentrer (fig. V-15). Les bordés en suage sont moins répandus.

Pour border les métaux et alliages autres que l'acier, des outils propres et les précautions habituelles sont nécessaires pour les pièces polies, surtout en aluminium. Un recuit local est indispensable pour les duralinox.

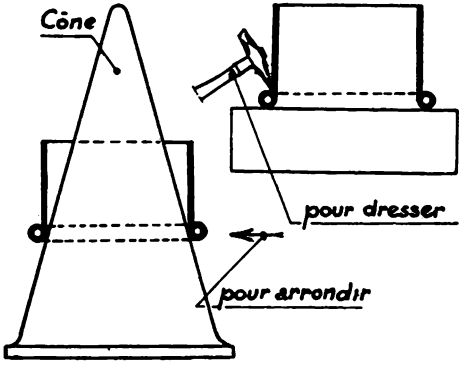



Fig. V-15.

## BORDAGE A LA MACHINE

***Bordés droits.*** — Sur une plieuse on prépare la tôle en exécutant une série de plis dans l'ordre indiqué par la figure V-16. Si la tôle est mince on peut serrer le fil par la pression du sommier (III).

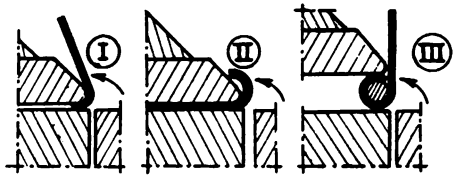



Fig. V-16. — Bordage à la plieuse.

Avec un montage spécial, on roule directement sur le fil en utilisant une cale sous le sommier, pour buter la tôle et éviter la flexion du fil (fig. V-17).

Il est possible de faire un travail analogue et beaucoup plus rapide sous une presse à plier (voir fig. III-78 et III-79).

Avec une machine à moulurer on peut préparer les bordés et enfermer le fil après le travail de la plieuse (fig. V-18).

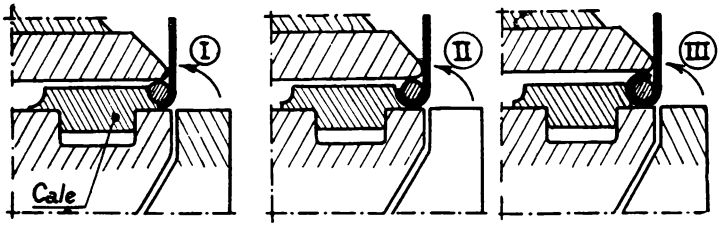



Fig. V-17. — Bordage sous une plieuse, avec butée.

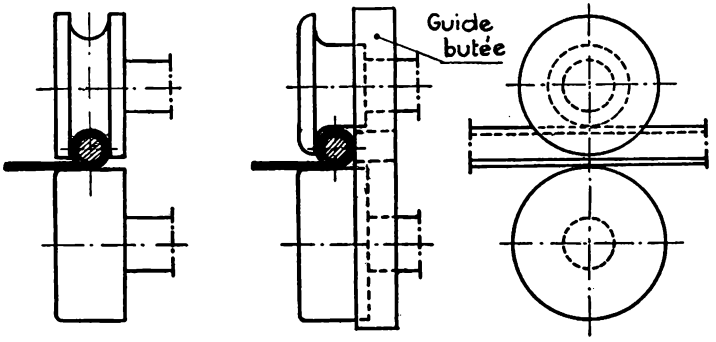



Fig. V-18. — Serrage d'un bordé sur une machine à moulurer.

***Bordés sur coupes circulaires ou sur viroles.*** — Sur une machine à moulurer on prépare, puis on ferme les bordés en suage (fig. V-19). De la même façon, on serre les bordés en cordon et les bordés circulaires sur tôles planes.

Dès qu'on aborde la moyenne série, il y a avantage à utiliser le tour à repousser. La pièce est montée sur un mandrin de forme en bois ou en métal. Avec l'outil à soutenir en bois on évase le bord, puis on prépare sa forme ronde. On ferme le bordé avec une molette sans mettre de fil généralement (fig. V-20).

A la presse, on ne peut envisager que les grandes séries et il n'est pas possible de border toutes les formes. Il est nécessaire que l'objet soit bien soutenu et maintenu pendant le bordage.

En principe, on roule le bord soit en une seule fois, soit en plusieurs opérations, sans fil le plus souvent, à l'aide d'un poinçon portant une gorge de dimension appropriée. Le schéma de la figure V-21

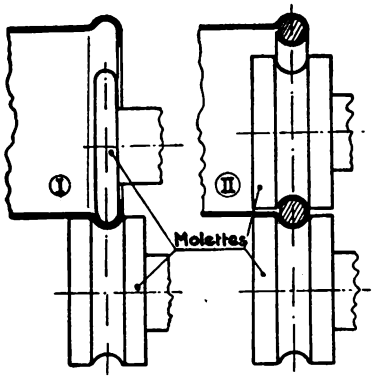



Fig. V-19. — Préparation et serrage d'un bordé en suage à la moulureuse.

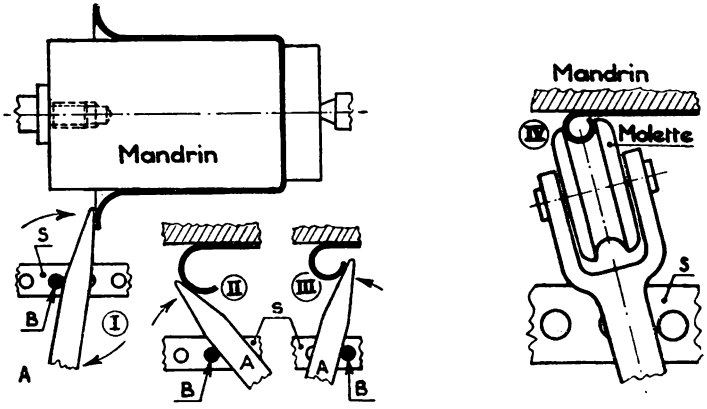



Fig. V-20. — Exécution d'un bordé au tour à repousser.
*S.* Support. — *B.* Broche.

donne une idée de la forme d'un outil à border un cylindre sans fil.

Pour border une tôle plane circulaire on opère en 2 passes. Un 1er outil à emboutir relève le bord et un 2e roule le bordé comme figure V-21.

Lorsque l'on veut border sur fil, il faut prévoir dans un outil ana-

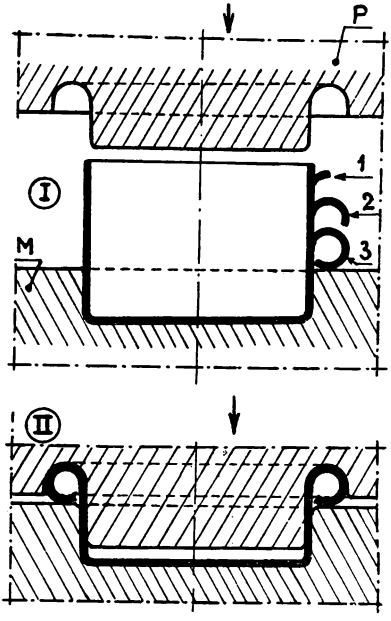



Fig. V-21. — Bordage à la presse (sans fil).

*P.* Poinçon. — *M.* Matrice. — 1, 2, 3. Formes intermédiaires.

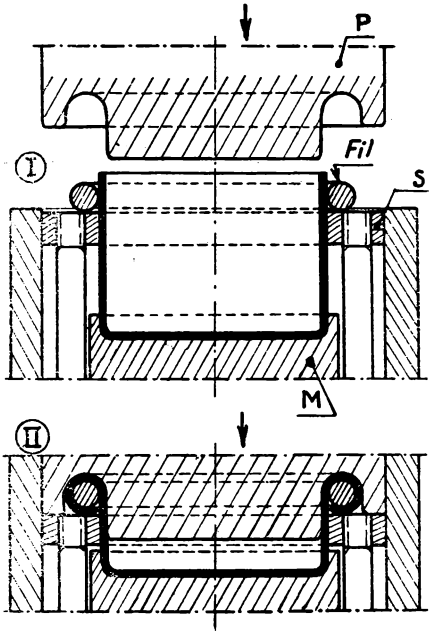



Fig. V-22. — Bordage à la presse (avec fil).

*P.* Poinçon. — *M.* Matrice. *S.* Serre-flan.

logue à celui de la figure précédente, un dispositif monté sur le serre-flan et destiné à soutenir le fil pendant le bordage. C'est généralement une couronne *S* maintenue par du caoutchouc, des ressorts ou l'air comprimé. Cette couronne accompagne le poinçon pendant sa descente (fig. V-22).

**Exécution de bords raidisseurs.** — La légèreté requise dans de nombreuses fabrications, oblige à utiliser des tôles très minces qui exigent en dehors des bordés, des raidisseurs dans les panneaux et surtout sur les bords (mobilier métallique, aviation, matériel roulant, etc.). Selon que le bord est droit ou circulaire, on lui donne de la rigidité par diverses solutions dont les croquis de la figure V-23 fournissent quelques exemples (voir aussi page 321).

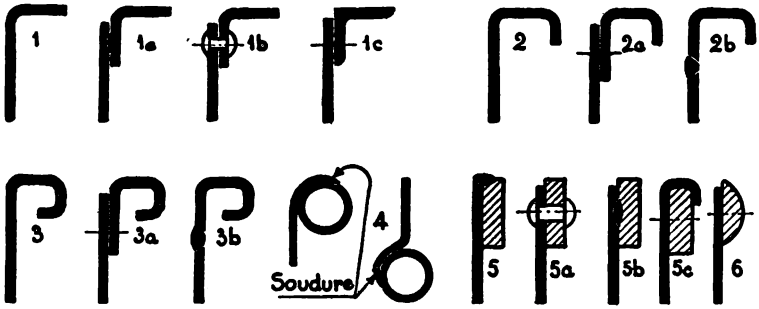



Fig. V-23.

1. Bord rabattu.
1*a*. Équerre tôle pliée soudée.
1*b*. Équerre tôle pliée rivée.
1*c*. Cornière rivée.
2. Bord 2 plis rabattu.
2*a*. Bord 2 plis soudé par points.
2*b*. Bord 2 plis soudé bord à bord.
3. Bord 3 plis rabattu.
3*a*. Bord 3 plis soudé par points.
3*b*. Bord 3 plis soudé bord à bord.
4. Tube serrurerie soudé (bordés en cordon et en suage).
5. Plat soudé sur champ.
5*a*. Plat rivé.
5*b*. Plat soudé par points.
5*c*. Tôle rabattue sur le fer plat.
6. Demi-rond soudé ou rivé.

# MOULURAGE

Pour donner de la rigidité aux tôles minces, on exécute des moulures dont la forme la plus courante a pour section un arc de cercle (fig. V-27). On peut moulurer des tôles planes, mais les applications les plus nombreuses se rencontrent dans les tôles envirolées (seaux, arrosoirs, moulures d'arrêt pour emboîtements, etc.).

**Outillage.** — L'outillage primitif qui comprend un marteau à suage et un suage (fig. V-24) est remplacé dans tous les ateliers par une machine à moulurer ou à moleter. Celle-ci, qui peut être commandée à la main, ou plus généralement au moteur, possède 2 molettes qui tournent en sens inverse (fig. V-25). Un réglage des molettes est possible en hauteur par la manœuvre d'une vis et, latéralement, par le déplacement de l'un des arbres de commande en *D*. La tôle est guidée par une butée plane *G*.

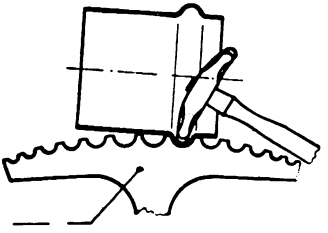


Fig. V-24. — Moulurage à la main.

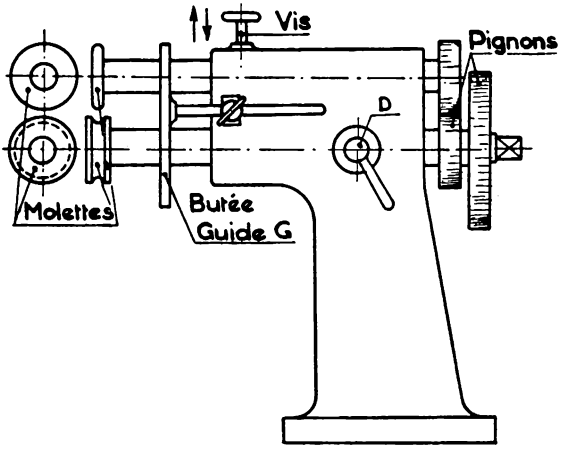



Fig. V-25. — Machine à moulurer.

La machine peut être complétée par un guide circulaire pour moulurer les cercles (nervures au bord des tôles) (voir fig. II-27, II-30 et III-232). Le col de cygne peu profond ne permet pas le moulurage au milieu des panneaux. Les moulures droites au bord ou au milieu des surfaces planes sont exécutées à la presse à plier.

**Moulurage sur machines alternatives.** — Sur une cisaille alternative (voir fig. II-30), ou une grignoteuse, on peut monter des outils de moulurage (fig. V-26 qui déforment de proche en proche, sur de toutes petites surfaces, mais à une cadence rapide. Le col de cygne profond de ces machines, permet de moulurer au milieu d'une grande tôle.

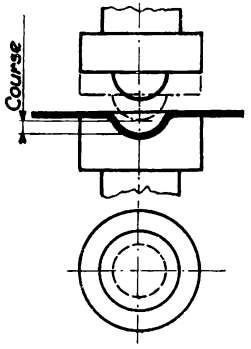


Fig. V-26.

En utilisant des guides droits, avec butées (voir fig. II-32) on peut faire, en série, des moulures droites ; avec des guides circulaires (voir fig. II-33), il est possible de moulurer suivant un cercle complet, ou un arc de cercle. On peut même, avec un dispositif de copiage (voir fig. II-45) et un gabarit, exécuter des moulures suivant un tracé quelconque.

**Moulurage des viroles.** — En principe, le profil d'une moulure est celui de la figure V-27. Mais, pratiquement, il y a déformation des surfaces voisines (fig. V-28). Si la moulure est extérieure, la tôle est rétreinte en *a* et *b* ; la déformation est inverse dans le cas d'une moulure intérieure (II).

Si la moulure est près du bord, celui-ci est rétreint ou étiré très sensiblement (III).

Une préparation au marteau à gorge sur un plomb, sur billot bois (fig. III-150 et III-151) ou dans un suage (fig. V-24), peut supprimer ces déformations. Ce travail est indispensable pour les grosses moulures.

Fig. V-27.

**Exécution.** — Généralement la moulure est parallèle au bord et il importe de maintenir celui-ci en contact avec le guide pendant tout le travail. Il est préférable d'opérer en plusieurs passes : à chaque tour, ou à chaque reprise on augmente légèrement la pression des molettes, ou de l'outil.

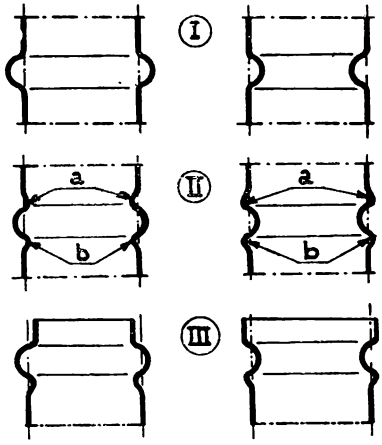



Fig. V-28. — Déformations dues au moulurage.

On doit éviter de monter des outils ayant même profil (fig. V-28 *bis*). Ceux-ci coupent la tôle de chaque côté de la moulure ; il faut que le rayon de l'outil en creux soit plus grand que celui de l'outil en relief pour le logement de l'épaisseur de la tôle (II).

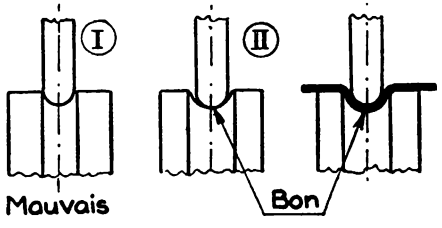



Fig. V-28 *bis*. — Profil des molettes.

**Applications.** — Le moulurage permet d'utiliser des tôles très minces et de faire des objets légers en raidissant les surfaces surtout au voisinage des bords. C'est le cas des objets et ustensiles d'utilisation courante.

Sur les mêmes machines on prépare, on ferme les bordés et les agrafes comme il a été vu aux chapitres précédents.

On peut exécuter en outre des travaux divers : étirage ou rétreinte de petits bords sur viroles, en une seule ou en plusieurs passes (voir fig. III-231 et III-232) ; cisaillage de tôles minces en montant des molettes de coupe à la place des molettes de forme.

# POLISSAGE

Dans le travail des métaux en feuilles, le polissage est une opération de finition dont le but est d'améliorer l'aspect des tôles, en faisant disparaître les traces laissées par la mise en forme.

En chaudronnerie on polit avant tout les outils (marteaux et tas divers) et moins souvent les objets fabriqués en cuivre, en laiton, en alliages légers, en inoxydable, etc.

**Outillage.** — Les machines — appelées tourets à polir — ont généralement 2 têtes avec, au milieu, le moteur (fig. V-29). Les roulements doivent être de bonne qualité en raison des grandes vitesses de rotation, et étanches aux poussières, ainsi que les moteurs.

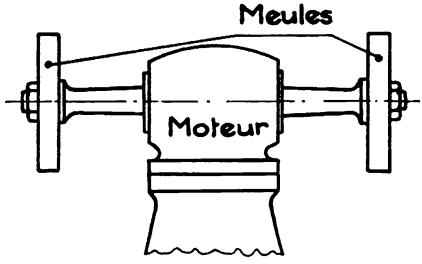



Fig. V-29. — Touret à polir.

Une aspiration efficace est indispensable pour évacuer à l'extérieur les poussières abrasives et métalliques.

Les meules les plus employées sont de 2 types :

*a)* Les feutres garnis d'abrasifs collés ;

*b)* Les meules souples en tissu appelées « tampons ».

Le feutre constituant les meules peut être plus ou moins pressé, ce qui donne des meules dures, demi-dures, demi-douces, douces, etc. Ces meules sont enduites, sur leur périphérie et après un encollage, d'une couche de poudre d'abrasif dont la grosseur des grains varie de 50 fils à 150 fils et plus (nombre, au $cm^2$, de fils utilisés pour le calibrage des grains d'abrasif).

On appelle « tampons » les meules formées de rondelles de tissu — calicot ou drap le plus souvent — maintenues par des flasques

ou des coutures dans leur partie centrale (fig. V-30). Par la rotation, les éléments de la meule se tiennent plans et serrés les uns contre les autres. On met sur la périphérie de ces tampons un produit abrasif à grains très fins livré dans le commerce sous forme de pains.

On utilise aussi, beaucoup des brosses en poils, appelées « Tampico ».

Il existe des meules de polissage dont le diamètre dépasse 500 mm. Couramment, les diamètres sont de l'ordre de 200 à 300 mm.

En général on adopte une vitesse circonférentielle moyenne de 30 à 40 m/s, ce qui donne une vitesse de rotation de 3 000 tr/mn environ pour une meule de 200 à 250 mm de diamètre.

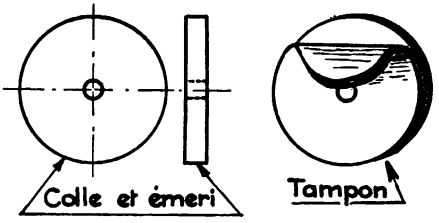



Fig. V-30. — Feutre pressé et tampon.

Les meules peuvent être montées sur les machines portatives électriques à flexible, ou pneumatiques pour le polissage des pièces de grandes dimensions en alliages légers et en aciers inoxydables surtout.

***Bandes abrasives sans fin.*** — Aux feutres encollés, longs à préparer, on préfère souvent les bandes abrasives, toutes prêtes, entraînées par un feutre, monté sur un touvet, et dont la tension est réglée par un tendeur (fig. V-31).

Ces bandes sont en toile très solide, et l'abrasif, dont elles sont recouvertes, est de grosseur différente, suivant le travail à exécuter ; le changement de bande est très rapide.

**Encollage des feutres.** — Après avoir détrempé avec de l'eau, la colle restant du premier encollage, on monte la meule sur le touret, on met en route, et avec un morceau de meule émeri, on met le feutre à nu. On achève le taillage et le nettoyage avec un morceau de pierre ponce.

Puis, avec des colles spéciales, à froid on enduit la périphérie, et on roule le disque aussitôt dans un récipient contenant de la

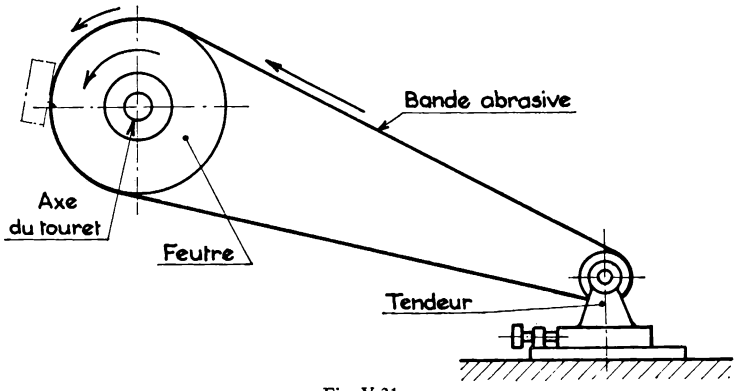



Fig. V-31.

poudre d'abrasif (fig. V-32). La pression exercée sur la meule pendant cette opération doit être progressive : presque nulle au début, puis de plus en plus accentuée pour devenir très forte vers la fin.

On laisse sécher avant la mise en service de la meule, et on peut mettre jusqu'à 3 couches d'abrasif en opérant, à chaque fois, comme pour la première après séchage.

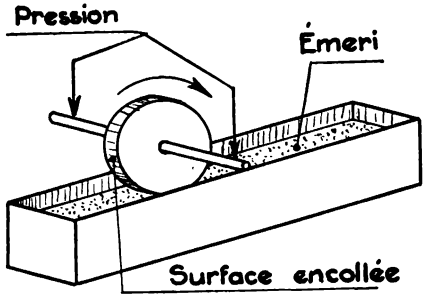



Fig. V-32. — Comment on colle l'émeri sur un feutre.

**Pratique du polissage.** — Si les traces à faire disparaître sont profondes, il faut disposer d'un jeu de feutres encollés ou de bandes avec des poudres d'émeri de grosseurs décroissantes. On commence sur un feutre ou une bande à gros grains, puis sur un autre à grains plus fins et on termine avec l'abrasif le plus fin.

Quel que soit le genre de meule ou d'abrasif utilisé *on croise toujours les traits,* en faisant tourner la pièce d'un quart de tour.

On graisse au suif, surtout pour les alliages légers et la pièce est déplacée de bas en haut (fig. V-33). Une pression prolongée et trop forte a pour effet d'élever la température et de brûler la colle, ce qui met rapidement le disque ou la bande, hors d'usage.

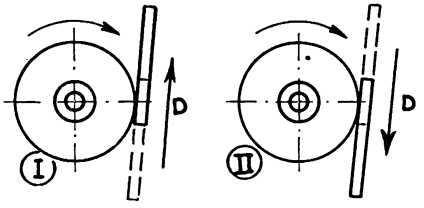



Fig. V-33. — Déplacement de la pièce.
I. Sur le feutre. — II. Sur le tampon.

On procède ensuite à « l'avivage » sur une meule Tampico, ou sur meules en tissu, que l'on enduit souvent, mais légèrement, avec une pâte à polir. Comme sur les feutres, les traits sont croisés, mais la pièce est déplacée de haut en bas (II).

De par leur souplesse même, ces meules exigent quelques précautions dans la présentation des pièces. La pression de l'objet à polir déforme la meule (fig. V-34). Si une arête — bord de la tôle ou bord d'un trou — est engagée dans la déformation du disque, la pièce est arrachée et projetée brutalement, et d'autant plus que la pression sur la meule est plus forte (I et II).

On évite ces accidents qui risquent de blesser les polisseurs et de

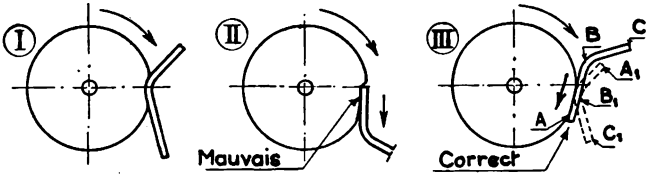



Fig. V-34. — Présentation des pièces sur le tampon.

détériorer les objets à polir, en meulant de *A* en *B* — du bord vers le milieu en descendant — (III), puis en retournant la pièce pour aviver la partie supérieure de *C* en *B*. Si la forme de la pièce oblige à approcher une arête comme croquis II, on appuie très légèrement.

Un excès de pâte à polir est nuisible et laisse des dépôts sur la tôle. On nettoie les meules — on dit couramment on les « dégraisse » — avec l'arête d'une tôle épaisse portant une bavure de cisaille.

CHAPITRE VI

# TRAVAIL DES PROFILÉS

On appelle profilés, les fers en barres ayant des sections étudiées pour offrir le maximum de rigidité, et de légèreté à la fois (sections à grand moment d'inertie).

***Profilés laminés.*** — Fabriqués à partir de billettes de section carrée ou rectangulaire, par ébauches successives dans des laminoirs à cannelures.

Les profilés les plus courants sont les cornières à ailes égales et inégales, les fers T, U et I. Tous les profilés normaux ont des arrondis à l'intérieur et sur les bords. Les rayons intérieurs sont égaux environ à l'épaisseur moyenne de l'aile.

Les cornières de profil normal ont pour épaisseur le 1/10 de la largeur de l'aile : 40 × 40 × 4. Il en existe à ailes plus épaisses : 40 × 40 × 5 ou 6.

Dans les fers U et I l'âme est moins épaisse que les ailes qui ont une pente à l'intérieur : 2 à 4 % pour les fers T, 8 % pour les fers U et 14 % pour les fers I. Toutes les dimensions de ces fers (largeur, épaisseur de l'âme et des ailes, arrondis, pentes) sont fonction de la hauteur *H*. Les profils normaux sont marqués d'un nombre qui indique la hauteur, suivi des 2 lettres *PN*. Ex. : UPN 120.

Pour le traçage des trous, les profilés sont trusquinés à la moitié de la largeur intérieure de l'aile (fig. VI-1).

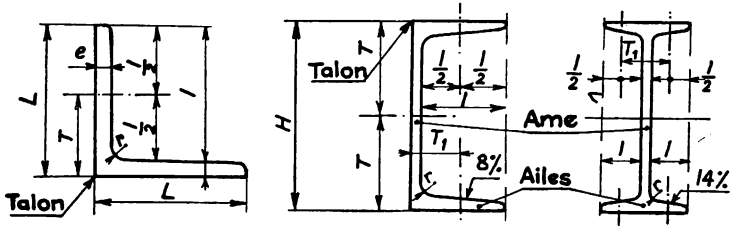



Fig. VI-1. — Profilés.
*T* = cote de trusquinage.

Parmi tous les profilés, c'est surtout la cornière qui est travaillée en chaudronnerie, quoique le développement du soudage en ait limité l'emploi.

***Profilés pliés.*** — Plus légers que les laminés, ils sont exécutés sur des presses-plieuses (voir fig. III-117 à 120). Ils n'ont pas d'angles vifs extérieurs (talon). La forme caisson (voir fig. VI-32) est particulièrement rigide et légère.

## DÉBIT DES PROFILÉS

**Cisaillage.** — Les profils *laminés* sont souvent coupés sur des cisailles ayant deux lames usinées au profil de la section à couper. Une des lames mobile, glisse sur l'autre lame fixe (fig. VI-2). Cette méthode, très rapide et très économique, a l'inconvénient de déformer les extrémités et ne convient pas pour les travaux de précision.

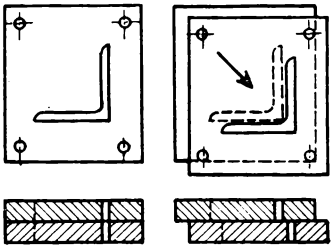


Fig. VI-2. — Lame de cisaille à cornières.

**Découpage par sciage.** — Les scies alternatives, à ruban, et surtout circulaires, donnent des coupes parfaitement dressées, avec précision, et sans aucune déformation. Méthode moins rapide et plus coûteuse que le cisaillage.

**Tronçonnage à la meule.** — Avec des meules minces (3 mm d'épaisseur) et d'un diamètre de 305 et 406 mm, animées d'une grande vitesse (jusqu'à 80 m/s), on coupe rapidement, proprement, sans déformations, et avec précision, les profilés laminés et pliés, et aussi les tubes, dans les petites et moyennes sections. Les meules sont agglomérées à l'aide de résines synthétiques et elles ont des grains à base d'alumine pour les métaux ferreux et à base de silicium pour les non-ferreux (voir meulage).

L'ensemble moteur-meule est monté sur un berceau articulé et équilibré et la pression exercée par l'ouvrier commande l'avance de la

coupe. La barre ou la pièce est fixée par des griffes à serrage rapide, commandées au pied ou à l'air comprimé, et le berceau est inclinable usqu'à 45° pour les coupes biaises.

Un banc support de barre est installé de part et d'autre de la meule, avec une règle de butée, souvent graduée pour les coupes unitaires. Pour la série, on préfère les butées réglables, parfois éclipsables, qui donnent des coupes rapides et précises, sans tracé.

**Grugeage** (voir fig. II-45 *bis*). — Surtout utilisé pour les entailles (préparation des assemblages).

**Oxy-coupage.** — Par oxy-coupage, on coupe les profilés sans les lever (en leur faisant faire « quartier » seulement), dans les magasins, sur les chantiers, et en n'importe quel point d'une construction;

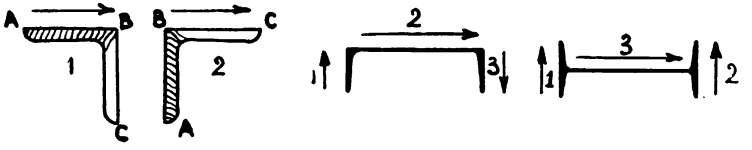



Fig. VI-3. — Ordre d'exécution des coupes sur profilés.

surtout avantageux pour la coupe des entailles de formes quelconques, quelle que soit l'épaisseur. Les coupes manuelles, sans montage de guidage, ne sont pas très précises, ni très nettes.

La figure VI-3 indique le processus de découpage des cornières fers *U* et *I*.

## DRESSAGE DES PROFILÉS A LA MAIN

**Cornières.** — ***Principe.*** — On dresse le *talon*. Celui-ci, qui est l'intersection de 2 plans, ne peut être droit que si les 2 faces de la cornière le sont. Les ailes sont considérées comme 2 fers plats, et dressées l'une après l'autre.

On rencontre 2 déformations : le cintrage et le gauche.

***Cornières cintrées.*** — *1er cas.* — L'aile est cintrée à l'extérieur (bord convexe) (fig. VI-4).

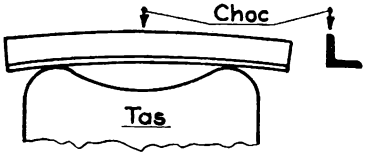



Fig. VI-4.

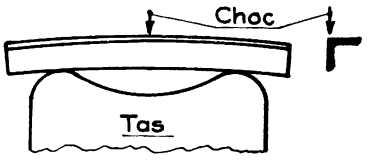



Fig. VI-5.

**Dressage au marteau entre appuis.**

On frappe à défaut entre 2 appuis distants d'environ 4 fois la largeur de l'aile. A chaque coup de marteau, on déplace la cornière pour espacer régulièrement les coups.

C'est au coup d'œil que l'ouvrier guide et contrôle son travail de correction, sur une aile, puis sur l'autre.

Souvent on préfère les chaudes de retrait qui ont l'avantage de diminuer la main-d'œuvre en supprimant la manœuvre des barres. Comme pour le dressage des tôles on chauffe rapidement et localement, avec un chalumeau puissant, le *bord qui est trop long* (fig. VI-6).

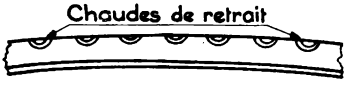



Fig. VI-6.

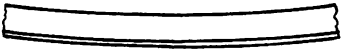


Fig. VI-7.

*2e cas.* — L'aile est cintrée à l'intérieur (bord concave). On peut frapper comme dans le cas précédent (fig. VI-5), mais pour les petites sections lorsque la déformation est de faible importance, il est plus simple d'allonger le bord à coup portant ; on espace régulièrement les coups dans la zone cintrée. Si le travail à la table du marteau ne suffit pas on utilise la panne (fig. VI-8) en frappant de l'extérieur ou de l'intérieur. Cette méthode a l'inconvénient de laisser des marques souvent profondes dans le métal.

Il est plus difficile d'utiliser, dans ce cas, les chaudes de retrait ; celles-ci sont moins efficaces parce que la surface à chauffer est trop importante par rapport à la surface qui resterait froide.

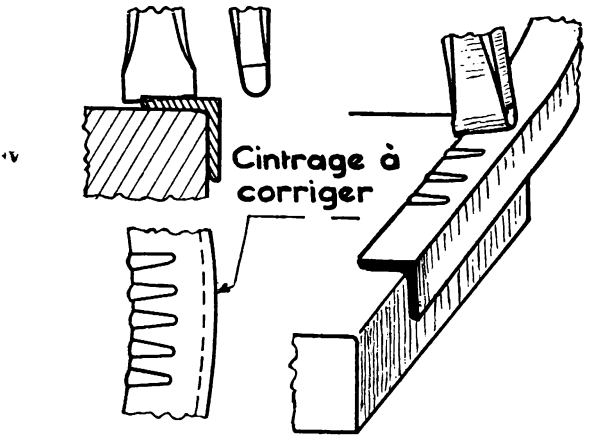



Fig. VI-8. — Dressage par allongement d'une aile à coup portant.

*Cornières gauches.* — Pour déceler le gauche on met une réglette à une extrémité, puis on déplace une autre réglette en l'éloignant de la première : s'il n'y a pas de gauche les 2 réglettes doivent rester dans le même plan, on dit « se dégauchir ». Au contraire, lorsqu'il y a inclinaison de l'une par rapport à l'autre la cornière est gauche (fig. VI-9). Pour dégauchir, on utilise des griffes (fig. VI-10).

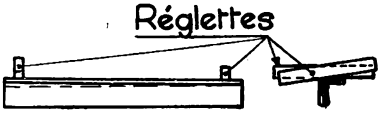



Fig. VI-9. — Cornière gauche.

La barre est serrée dans un étau ou dans un montage de dimension permettant le déplacement sans desserrage. Avec une griffe, on exerce un effort de torsion dans le sens convenable pour le dégauchissage

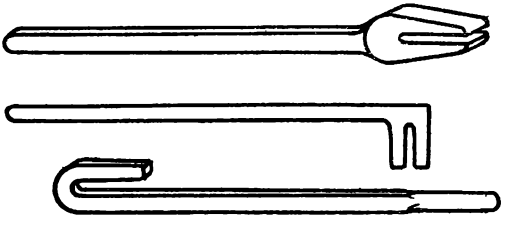


Fig. VI-10. — Griffes.

(fig. VI-11). Pour dépasser la limite élastique il est nécessaire d'exécuter une déformation plus importante que celle que l'on veut finalement

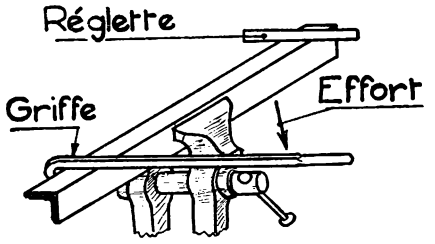



Fig. VI-11. — Dégauchissage d'une cornière à la griffe.

obtenir. Le métal fait « ressort », et d'autant plus que la distance entre l'étau et la griffe est plus grande.

Par déplacements successifs, en opérant de proche en proche, on dégauchit et le résultat est atteint lorsqu'une réglette étant placée à une extrémité, l'autre réglette, posée en n'importe quel point de la barre, est dans le même plan que la première.

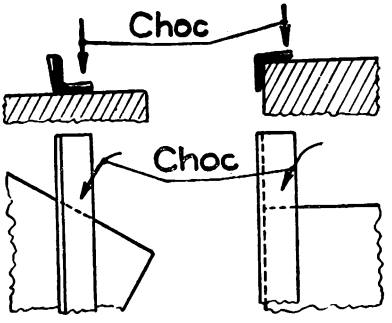



Fig. VI-12. — Dégauchissage d'une cornière au marteau.

Pour les fortes sections il faut, avec de grosses griffes, des montages solides sur le marbre pour maintenir la cornière.

A défaut de griffe et de montage, on peut dégauchir au marteau comme une bande de tôle (fig. VI-12). On frappe à défaut sur le bord d'un marbre à une distance du point d'appui égale au moins à la largeur de l'aile ; à chaque coup de marteau on déplace régulièrement la barre sur le tas, en frappant de l'intérieur ou de l'extérieur (fig. VI-12).

**Fers en T, U et I.** — Tout ce qui vient d'être dit pour les cornières peut s'appliquer aux autres profilés. La figure VI-13 montre la position des fers T, U et I, pour la correction au marteau des différentes déformations par cintrage. Les chaudes de retrait sont applicables sauf lorsque le bord de l'âme, ou de l'aile, est concave comme figure VI-7.

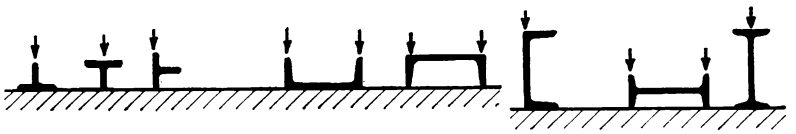


Fig. VI-13.

**Dressage des profilés à la machine.** — On utilise quelquefois des presses à vis, mais plus généralement des presses hydrauliques, dont le piston est soit vertical, soit horizontal pour les fortes sections (le fer cintré reste dans le plan horizontal).

Le poinçon agit entre deux tasseaux, dont l'écartement *E* (fig. VI-13 *bis*) est variable avec la dimension des fers à dresser. Pour les cornières, il faut des tasseaux avec cales (fig. VI-13 *bis*).

Le dressage est exécuté par déplacements réguliers de la barre.

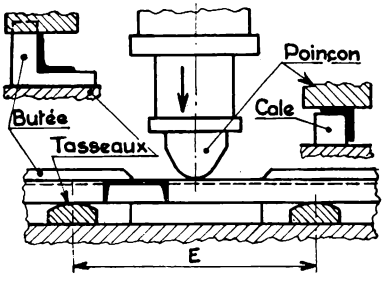



Fig. VI-13 *bis*. — Presse à dresser les profilés

## CINTRAGE DES PROFILÉS

Ce travail est toujours difficile en raison des déformations des profils, dus au cintrage. On cintre surtout les cornières, les fers T et U — moins souvent — et plus rarement les fers I.

Pendant le cintrage les ailes et les âmes ne restent pas planes et prennent du faux-équerre. Si on cintre suivant le plan ou les plans de symétrie de la section (fig. VI-14), les efforts s'équilibrent. Pour cintrer

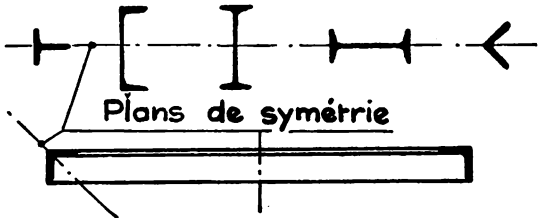



Fig. VI-14. — Plans de symétrie des divers profils.

suivant un autre plan (cornières) il faut lutter contre la tendance du profilé à se cintrer suivant son plan de symétrie (fig. VI-15).

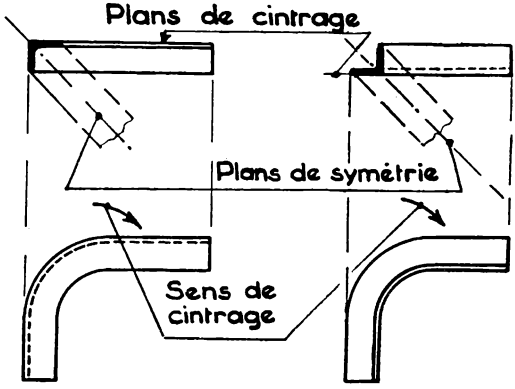



Fig. VI-15. — Positions relatives des plans de symétrie et des plans de cintrage (cornières).

**Cintrage à la main.** — *A froid.* — Cette méthode applicable aux faibles déformations s'apparente au dressage au marteau (voir fig. VI-4 à VI-8) ou à la presse pour les fortes sections. Les coups de marteau — ou de presse — sont régulièrement espacés et le rayon de cintrage est contrôlé avec un gabarit.

*A chaud.* — On peut mentionner ici les chaudes de retrait applicables surtout lorsque le bord est concave comme pour le dressage et pour les grands rayons de cintrage.

Dès que la déformation est importante, le chauffage total de la section est nécessaire et on travaille presque toujours sur forme exacte. On chauffe aux chalumeaux ou mieux dans un four à lon-

gueur de chauffe variable — fours à mazout ou à gaz — En principe le profilé est bridé solidement sur la forme, et pendant le cintrage obtenu par effort exercé sur le bout de la barre, les déformations du profil sont corrigées au marteau sur la forme (fig. VI-16).

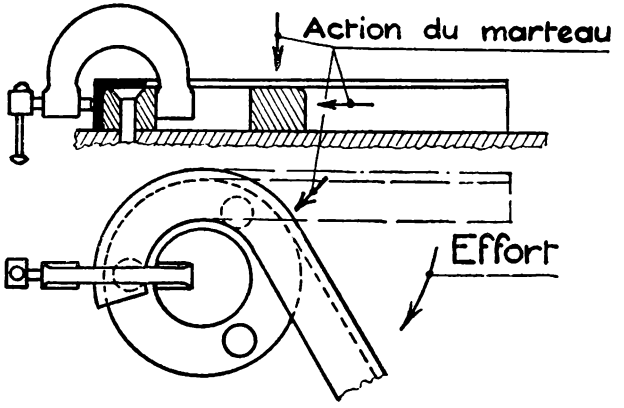



Fig. VI-16. — Principe du cintrage d'une cornière sur forme.

*Cintrage des cornières.* — Les cornières ne sont que très rarement cintrées suivant leur plan de symétrie. On cintre presque toujours dans le plan de l'une des ailes.

Pendant le cintrage la cornière tend à se déformer dans le plan de symétrie, incliné à 45° (par rapport aux plans des ailes). Pratiquement, le bout de la barre descend (fig. VI-15) lorsqu'on cintre l'aile à l'intérieur comme croquis I.

Il en est de même si on cintre l'aile à l'extérieur dans la position du croquis II.

L'ouvrier qui, généralement, « tire » sur le bout de la barre pour le cintrage, s'oppose à ces déformations et s'efforce de maintenir la cornière dans le plan désiré, à l'aide d'une griffe.

Ceci n'est pas possible lorsque la barre est courte. Dans ce cas, on exécute avant le cintrage, et dans la même chaude, une déformation en sens inverse de celle qui se produit pendant le cintrage. Exemple : figure VI-17. On relève la cornière avant le cintrage par déformation de l'aile verticale (I) pour compenser la déformation qui tendrait à faire descendre le bout de la barre. L'importance de

cette déformation préalable est variable avec le rayon de cintrage et est déterminée après quelques essais.

On opère de la même façon dans le cas du croquis II. Si la défor-

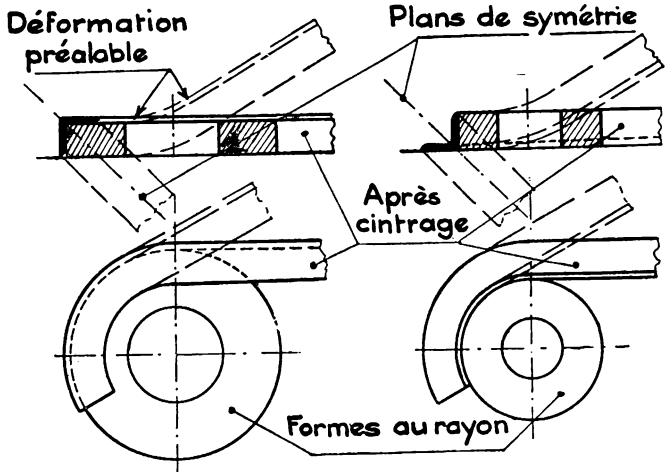



Fig. VI-17. — Cintrage d'une cornière sur forme.

mation préalable est convenable, après cintrage la cornière revient naturellement dans le plan désiré.

Après avoir cintré suivant toute la longueur chauffée, on s'applique à faire porter le talon ou l'arrondi intérieur sur la forme, pour régler le rayon de cintrage et mettre l'ensemble bien plan.

Enfin, on fait coller les ailes sur la forme, pour corriger les déformations qui se produisent dans le sens indiqué par le croquis (fig. VI-18).

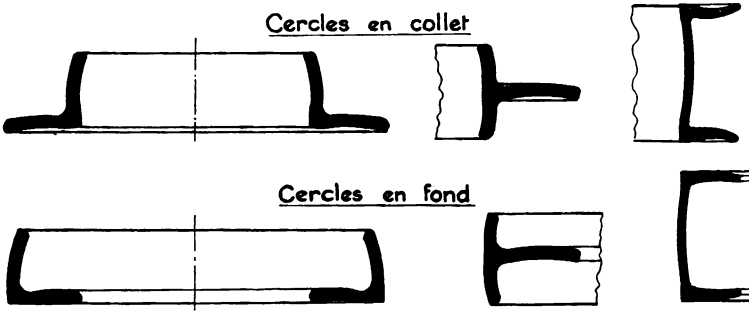



Fig. VI-18. Fig. VI-19.

***Cintrage des fers T, U et I.*** — Ces fers sont généralement cintrés suivant leur plan de symétrie, ce qui supprime les déformations préalables.

Pratiquement, on évite les cintrages suivant de faibles rayons qui déforment fortement les profils, ce qui exige des corrections toujours difficiles. Le croquis (fig. VI-19) indique comment se déforment les profils des fers T et U pendant le cintrage.

**Cintrage des profilés en métaux non ferreux.** — On opère comme pour l'acier. Avec les alliages légers, il faut des formes de cintrage propres, en bois traité pour le travail à froid et en métal poli pour le travail à chaud.

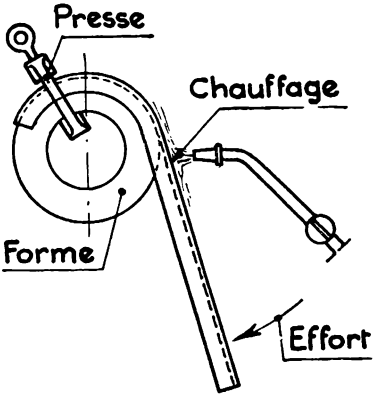



Fig. VI-20. — Cintrage d'une cornière en duralumin.

Cette dernière méthode s'applique surtout au duralumin et aux duralinox. La barre est bridée sur la forme et chauffée sur place. Pendant le chauffage on exerce une pression sur le bout de la barre (fig. VI-20) et on « sent » que la température convenable est atteinte lorsque le métal cède sous l'effort exercé. Après cintrage, et pendant que le métal est encore chaud, on fait les corrections de profil nécessaires.

**Cintrage à la machine.** — On cintre à froid le plus souvent, sur des machines analogues aux cintreuses à tôle. Elles comportent trois

galets de forme, usinés au profil à cintrer (fig. VI-21). Dans certains modèles, le galet supérieur est réglable en hauteur, pour faire varier le rayon de cintrage; dans d'autres modèles, ce sont les deux galets inférieurs qui sont réglables.

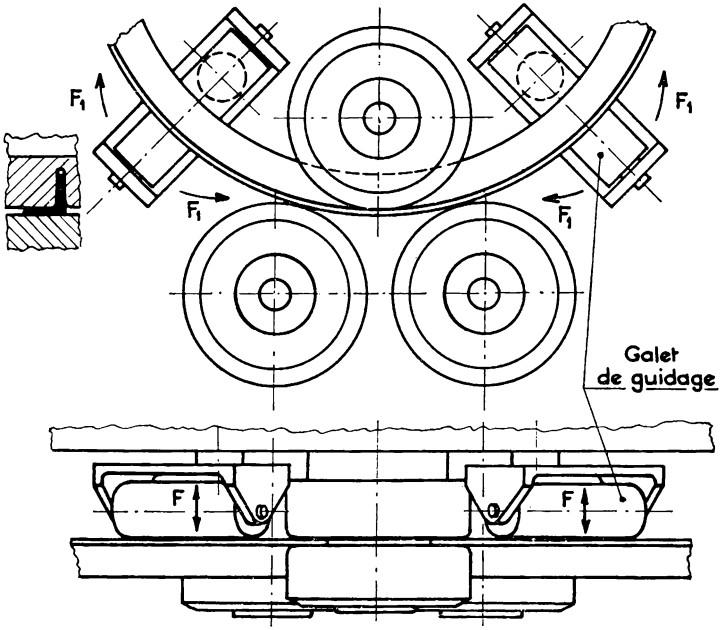



Fig. VI-21. — Schéma d'une machine à cintrer les profilés (cornière en fond).

Souvent, comme dans certaines cintreuses à tôle, les trois galets sont moteurs, ce qui exige des transmissions avec cardans pour les galets réglables, et dans certaines machines, il existe un mécanisme de glissement, qui compense les différences de vitesse entre les galets extérieurs et intérieurs.

Si les trois galets ne sont pas moteurs, ils sont cannelés, pour assurer l'entraînement du fer, ce qui a l'inconvénient de laisser des marques sur les profilés.

De plus des galets de guidage réglables suivant les flèches $F$ et $F_1$ (mécanismes non figurés sur la figure VI-21), maintiennent le profilé dans le même plan de cintrage. Indispensables pour les cornières, leur action, suivant la flèche $F$, correspond au cintrage préalable de l'autre aile, avant cintrage à la main.

Dans les fabrications de série, on gauchit légèrement à l'aide des galets de guidage de façon à obtenir une forme hélicoïdale comparable à celle des ressorts à boudin à spires jointives. En coupant à la longueur convenable, on obtient des cercles au diamètre désiré. Les schémas simplifiés des figures VI-22 et VI-23 montrent la forme de galets de cintrage d'une cornière en collet (aile extérieure) et d'un fer U (aile intérieure).

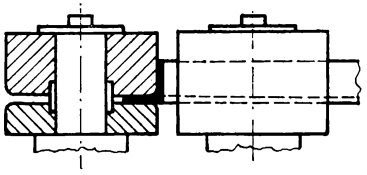


Fig. VI-22.

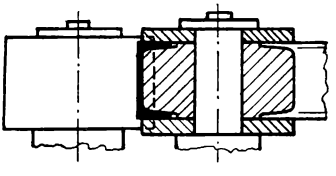


Fig. VI-23.

Ces machines d'un haut rendement lorsqu'elles sont réglées, laissent toujours une partie droite à l'amorçage et ne conviennent pas pour les petits rayons.

**Simplification de la mise en forme par le soudage.** — Pour le coudage, et les cintrages suivant de faibles rayons, par découpage ou par entailles, et par soudage, on supprime la mise en forme toujours difficile et coûteuse.

***Coudage.*** — On peut entailler une aile et plier l'autre comme un fer plat (fig. VI-24). Souvent, on préfère couper les deux fers, et souder toute la section (fig. VI-25); ces croquis de cornières peuvent s'appliquer aux fers U.

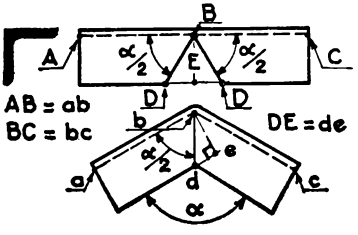



Fig. VI-24.

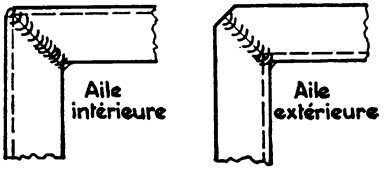



Fig. VI-25.

***Cintrage sur faibles rayons.*** — On découpe seulement l'aile (ou les ailes) qui serait cintrée sur champ, et on cintre l'autre aile sur plat facilement, puis on rapporte un secteur découpé dans de la tôle (fig. VI-26). Il est souvent avantageux de couper une couronne complète (par oxy-coupage, cisaillage ou grignotage) puis de couper le secteur (ou les secteurs) à l'angle désiré.

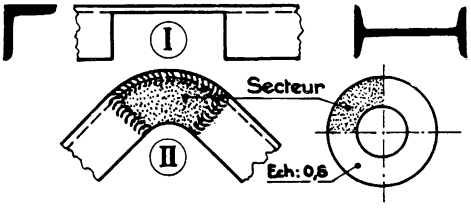



Fig. VI-26.

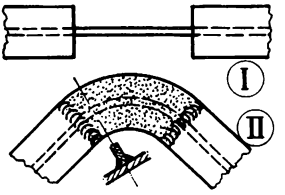



Fig. VI-27.

La figure VI-27 montre une des méthodes utilisées pour les fers I. On pourrait aussi souder un secteur pour l'aile intérieure et un secteur pour l'aile extérieure.

Pour tous les profilés, et surtout les fortes sections, on peut encore faire des coudes complets (ailes et âme) en tôle soudée, et rabouter sur des barres droites (comme les courbes des tubes).

**Assemblage des profilés.** — En chaudronnerie, on assemble presque uniquement par soudage. On découpe les ailes comme le montrent les figures VI-28 à VI-30 et on soude à l'arc. Des assemblages d'équerre se préparent comme les assemblages en T des croquis.

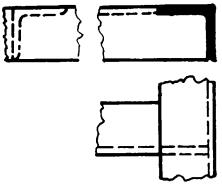


Fig. VI-28.

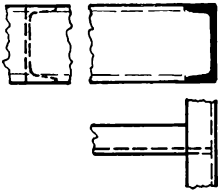


Fig. VI-29.
Assemblage de profilés.

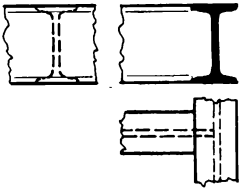


Fig. VI-30.

**Utilisation des profilés.** — Les profilés laminés sont surtout utilisés en charpente. En chaudronnerie, ils servent comme raidisseurs et renforts des réservoirs, trémies, bacs, etc., en tôles moyennes

et épaisses. Dans les constructions en tôles minces et moyennes, on emploie les profilés pliés.

Les figures VI-31 et VI-32 donnent quelques exemples de renforcement de bords et de parois à l'aide de profilés.

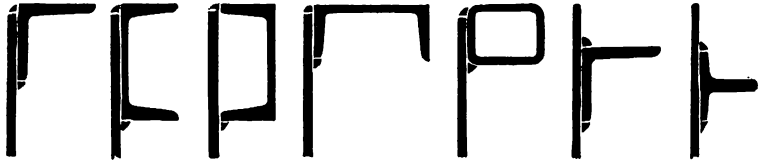


Fig. VI-31. — Raidissage par profilés laminés.

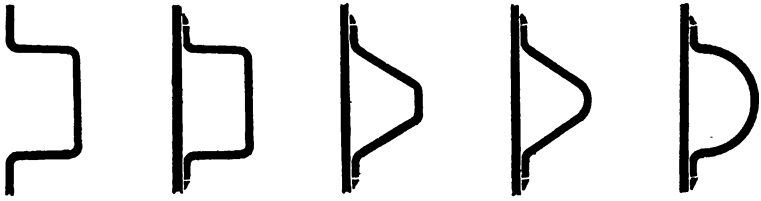


Fig. VI-32. — Raidissage par profilés pliés.

Les raidisseurs sont généralement soudés à l'arc par soudures discontinues, et soudés par points, pour les tôles minces.

CHAPITRE VII

# TRAVAIL DES TUBES

Presque tous les métaux et alliages de laminage sont utilisés sous forme de tubes, soit pour le transport des fluides divers, soit pour les constructions métalliques dans lesquelles ils remplacent souvent avantageusement les profilés.

## TUBES D'ACIER

Ce sont les plus répandus, et ils se classent en deux catégories : les tubes sans soudures, et les tubes soudés.

***Fabrication.*** — Les tubes sans soudure sont percés à partir d'un lingot plein, ce qui donne une ébauche courte et épaisse (fig. VII-1) que l'on étire ensuite sur des laminoirs spéciaux.

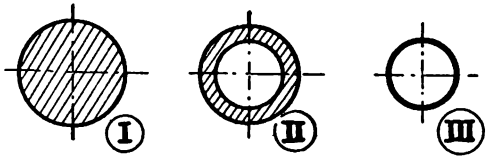



Fig. VII-1. — I. Lingot plein. II. Ébauche. III. Section du tube laminé.

Les tubes soudés sont obtenus à partir d'une bande de tôle (fig. VII-2) qui peut être roulée à froid (petits ⌀) soit dans une cloche, soit dans un train de galets, par déformation progressive (fig. VII-3), soit sur presse plieuse (voir fig. III-77). Certains tubes sont formés à chaud; ils sont à la fois cintrés et soudés,

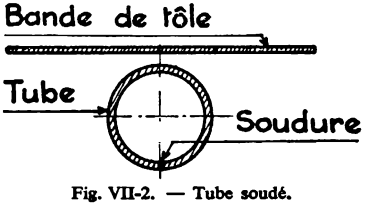



Fig. VII-2. — Tube soudé.

par rapprochement, par le passage dans une cloche. Les tubes roulés à froid sont soit soudés par résistance électrique par la pression de deux galets-électrodes, soit par induction et rapprochement.

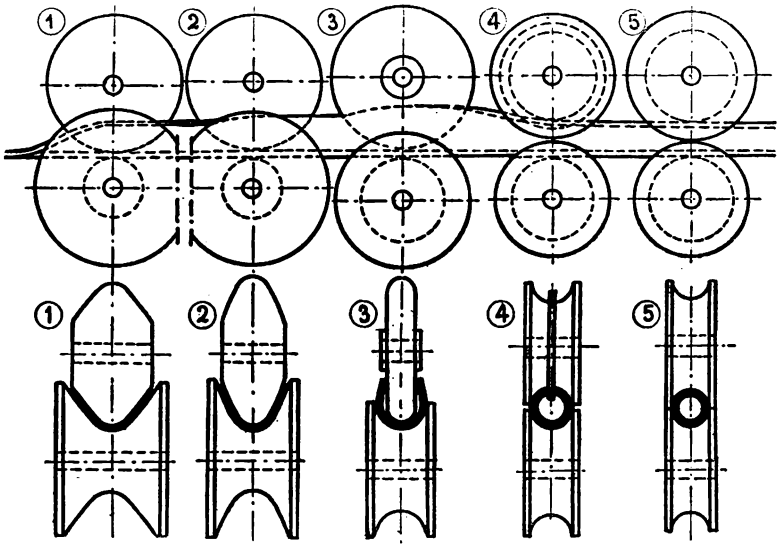



Fig. VII-3. — Fabrication par *déformation progressive* de tubes soudés.

**Tubes sans soudure** dits : qualité Chaudière ou Standard. Norme A 48-005. Commercialement : Tarif 10.

Désignation : par leur ⌀ ext. et leur épaisseur, ou par leur ⌀ nominal (cote arrondie voisine du ⌀ int.). On retrouve le ⌀ nominal dans la désignation des brides, robinetteries, etc. Les diamètres extérieurs sont normalisés jusqu'à 419 mm et les épaisseurs augmentent — de 3,2 à 20 mm — avec le ⌀, et avec la pression d'utilisation.

Qualités : nuances A (surtout), C, XC et aciers alliés. Les extrémités ne sont pas filetées. Pression d'épreuve : 60 bar.

Utilisations : chaudières, moyennes et hautes pressions, pipe-lines, industries chimiques et pétrolières, etc.

**Tubes « gaz ».** — Existent en trois catégories. *Série moyenne* NF-E 29-025 (tarif 3) et *série forte* NF-E 29-026, sont livrés sans soudure (sur demande soudés par rapprochement); *série légère* NF-E 29-027 soudés par rapprochement, jusqu'au ⌀ 88,9 inclus. Tarif 1, jusqu'à 2″, et tarif 2, jusqu'à 6″.

***Désignation.*** — Par leur ⌀ int. en pouces, ou par leur ancienne désignation en millimètre, ou par leur ⌀ nominal (voir tableau VII-4).

TABLEAU VII-4

*Tubes gaz. Série légère.*

NF-E 29-027

| Désignation | | Diamètre nominal correspondant | Diamètre extérieur | Épaisseur | Pas | | Longueur filetée sur tube |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| pouces | ancienne mm | mm | mm ≈ | mm ≈ | mm | Nombre de filets au pouce | mm |
| 1/8 | 5-10 | 6 | 10,2 | 1,8 | 0,907 | 28 | 10 |
| 1/4 | 8-13 | 8 | 13,5 | 2 | 1,337 | 19 | 11 |
| 3/8 | 12-17 | 10 | 17,2 | 2 | 1,337 | 19 | 13 |
| 1/2 | 15-21 | 15 | 21,3 | 2,35 | 1,814 | 14 | 16 |
| 3/4 | 20-27 | 20 | 26,9 | 2,35 | 1,814 | 14 | 19 |
| 1 | 26-34 | 26 | 33,7 | 2,90 | 2,309 | 11 | 22 |
| 1 1/4 | 33-42 | 33 | 42,4 | 2,90 | 2,309 | 11 | 25 |
| 1 1/2 | 40-49 | 40 | 48,3 | 2,90 | 2,309 | 11 | 25 |
| 2 | 50-60 | 50 | 60,3 | 3,25 | 2,309 | 11 | 28 |

Dans les trois catégories, les ⌀ extérieurs sont identiques; c'est l'épaisseur qui varie, et par suite le ⌀ intérieur. Qualité : nuance A, presque uniquement. Sont livrés généralement filetés et peuvent être noirs ou galvanisés.

***Utilisations.*** — Tubes qualité courante, série légère, pour basse pression (10 bar maxi.) pour installations dans le bâtiment : eaux, gaz, chauffage; dans l'industrie : air comprimé, constructions métalliques, etc. Série forte pour moyennes pressions.

***Tubes pétrole.*** — Tubes sans soudure, aux normes américaines (voir p. 340).

**Tubes minces** dits **tubes serrurerie,** NF 48-102. — Soudés électriquement par résistance, et désignés par leur ⌀ ext. qui varie de 2 en 2 mm jusqu'au ⌀ 32 et de 3 à 5 mm jusqu'au ⌀ 70; ⌀ maxi. : 114 mm. Les épaisseurs courantes 1, 1,25, 1,50 et 2 mm augmentent avec le ⌀. Qualité : nuance A.

## DÉBIT DES TUBES

**A la main.** — On peut utiliser la scie à métaux, mais on emploie surtout les coupe-tubes à molettes (fig. VII-5). La coupe est rapide, avec l'inconvénient de laisser à l'intérieur et à l'extérieur, de fortes bavures, qu'il faut faire disparaître à la lime, ou à l'aide de fraises manœuvrées à l'aide d'un levier à cliquet. Il existe également des coupe-tubes à lames (ou à couteaux) qui donnent une coupe plus propre avec peu de bavures; plus coûteux.

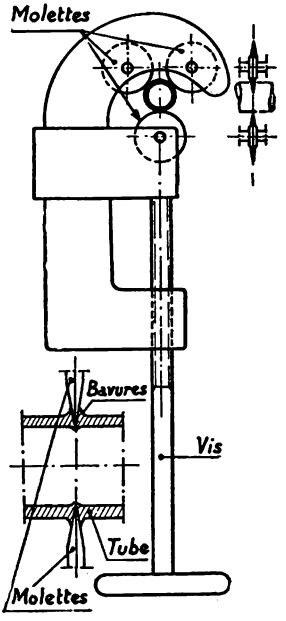


Fig. VII-5. — Coupe-tubes à molettes.

**Découpage mécanique.** — ***Tronçonneuse à meule*** (voir p. 308). — Coupes planes seulement, droites ou obliques (bavures importantes).

***Tronçonneuse à couteaux.*** — Le tube est immobilisé, et une tête tournante portant plusieurs couteaux, exécute une saignée. Coupes parfaitement dressées avec bavures insignifiantes; pour coupes perpendiculaires seulement.

On utilise aussi les *scies circulaires* et *alternatives.*

***Oxy-coupage*** avec chalumeaux coupeurs pour faibles épaisseurs. On peut faire des coupes quelconques (piquages droits ou obliques), avec des gabarits de guidage.

**Usinage des extrémités pour piquages.** — On utilise des grugeoirs à tubes (fig. VII-6) pour les petits ⌀ et des grignoteuses munies d'un porte-matrice spécial. Il existe également des machines complexes qui coupent au chalumeau n'importe quelle intersection, après un réglage en fonction du ⌀ des 2 tubes, et de l'angle formé par les axes des tubes.

Si les tubes exigent un dressage, on l'exécute à la main, par pres-

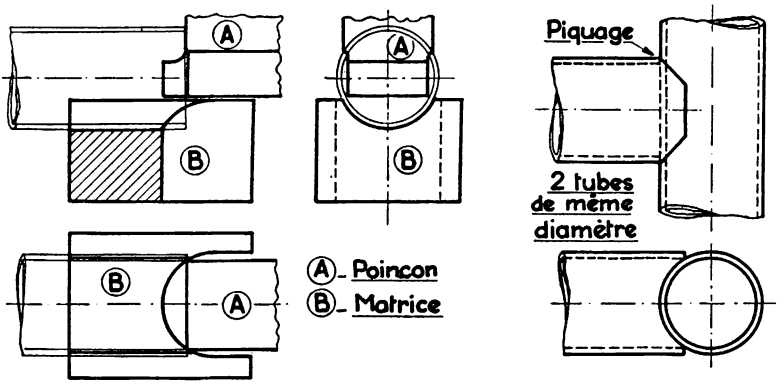



Fig. VII-6.

sion, entre deux butées, comme pour le cintrage (fig. VII-9) ou mieux, sur une presse du genre de celle de la figure VII-16.

## CINTRAGE DES TUBES

La longueur développée d'un tube cintré se mesure, en principe, sur la fibre neutre (axe). Cette longueur peut varier avec le rayon de cintrage, le diamètre du tube, la méthode de cintrage, etc., et il est prudent de faire quelques essais avant de lancer une série. Pendant le cintrage, le tube tend à s'ovaliser (fig. VII-7) et d'autant plus que

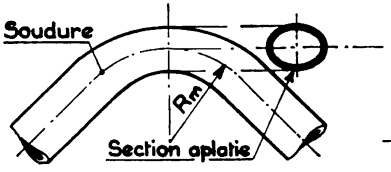



Fig. VII-7.

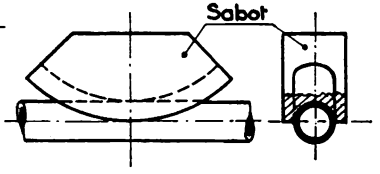



Fig. VII-8.

le rayon de cintrage et l'épaisseur sont plus faibles, et le diamètre du tube plus grand. Par les différentes méthodes de cintrage, on s'efforce de supprimer — ou du moins de limiter — cette déformation.

On situe la soudure, sur la ligne neutre qui n'est pas déformée. Lorsque le tube est cintré dans plusieurs plans, on place la soudure

de telle façon qu'elle ne soit, dans aucun coude, à l'extérieur, ou à l'intérieur du coude (déformations maxi.).

Rayon de cintrage moyen mini. pour tubes gaz à vide : 3 à 3 1/4 $d$; $d$ = ⌀ ext. du tube.

**Cintrage à la main à vide.** — ***A froid.*** — Entre deux butées ou deux broches dans un étau ou un marbre à trous (fig. VII-9). Par déplacements successifs et réguliers, on obtient les coudes désirés. Pour petits ⌀ seulement.

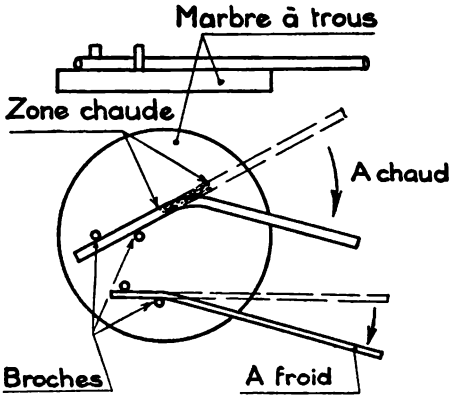



Fig. VII-9. — Cintrage d'un tube à froid et à chaud sur marbre à trous.

***A chaud*** (Pas pour tubes galvanisés). — Le chauffage est exécuté aux chalumeaux divers — ou dans un four pour les gros ⌀ — et il doit intéresser toute la longueur du coude, chaque fois que c'est possible.

La zone chaude ne doit pas porter sur les butées, ce qui marquerait le tube (fig. VII-9). Celui-ci se cintre là où il est chaud, et non à l'endroit où il porte sur les butées. On contrôle le cintrage avec un gabarit de la ligne neutre, en fer rond de ⌀ 6 à 10 mm (fig. VII-11).

Si le tube se cintre trop, en un point, on refroidit à l'eau, dès que ce défaut se manifeste. On peut aussi réchauffer au chalumeau, là où il se forme un « jarret » (plat).

L'effort de traction est exercé à la main pour les petits ⌀. Pour les gros ⌀, on tire sur le tube avec un câble — entraîné par un treuil — par l'intermédiaire de poulies de renvoi, disposées autour du marbre à trous.

Si le tube s'ovalise, on corrige cette déformation, au maillet ou au marteau, avant le refroidissement.

Dans tous les cas, on doit veiller à ce que toute la longueur du coude reste bien dans le même plan.

**Cintrage à la main au sable.** — Les tubes de moyens et gros diamètres cintrés suivant de faibles rayons et les tubes minces, travaillés à vide, s'ovalisent exagérément, et même s'écrasent.

On remplit le tube de sable ou de sablon *bien sec.* Une extrémité du tube est fermée par un bouchon conique en bois, ou un bouchon acier pointé à l'arc. Puis, le tube placé debout est rempli de sable et

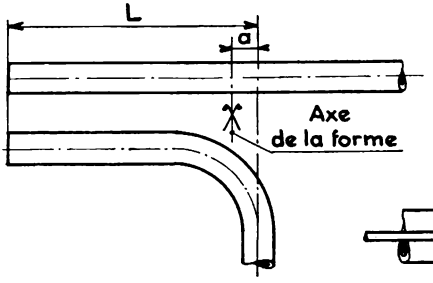



Fig. VII-10.

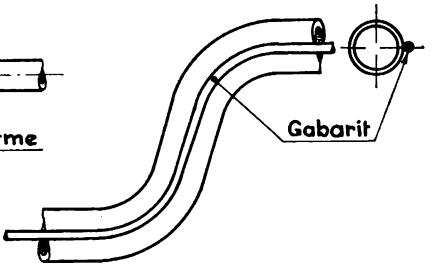



Fig. VII-11.

tassé très soigneusement par de petits chocs répétés. *Du soin apporté à cette opération, dépend la réussite du cintrage.* Les ateliers bien équipés, disposent d'un puits pour loger le tube debout, avec une trémie de stockage du sable, et un collier portant trois vibreurs pneumatiques, est déplacé le long du tube pour tasser parfaitement le sable; on ferme alors l'autre extrémité.

Le chauffage est plus lent pour permettre de chauffer le sable à cœur, et le cintrage s'opère comme à vide.

**Cintrage de tubes par exécution de plis à l'intérieur du coude.** — Le tube, bridé sérieusement, est chauffé suivant une demi-circonférence, à l'aide d'un chalumeau, dans la zone refoulée par le cintrage. Lorsque le métal est suffisamment chaud, on exerce une traction dans le sens du cintrage et sous l'action de l'effort de compression il se forme un pli qui permet le coudage du tube à cet endroit

(fig. VII-12). Suivant le rayon désiré, on détermine l'écartement et l'importance des plis.

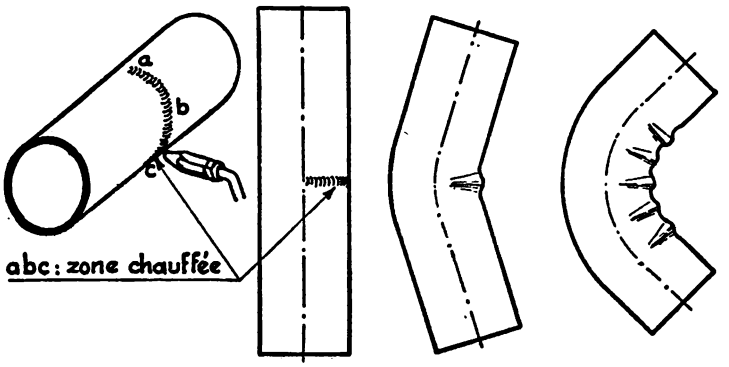



Fig. VII-12. — Cintrage d'un tube par plissement intérieur.

Ce travail, qui présente des analogies avec le cintrage d'un bord plié par rétreinte de plis (fig. III-157) et avec la fabrication mécanique, à froid, des coudes de poêle, s'applique aux tubes à parois minces, par rapport au diamètre.

**Cintrage à la machine** — On cintre généralement à froid, et à vide, sauf dans des cas difficiles où le remplissage est nécessaire.

Les différentes méthodes de cintrage tendent, toutes, à cintrer les tubes, le plus rapidement possible, en évitant l'ovalisation de la section, la formation de plis à l'intérieur (zone comprimée) et la déchirure à l'extérieur (zone tendue). Dans tous les cas, la forme des galets — ou sabots — épouse parfaitement le diamètre extérieur du tube (voir fig. VII-8).

*Cintrage par pression.* — MACHINE DE CHANTIER. — Un galet cintreur portant l'empreinte exacte du profil extérieur du tube est commandé par une vis (fig. VII-13) ou mieux par une pompe à huile. Le tube repose sur 2 galets d'appui qui peuvent s'orienter autour d'un axe qui les traverse, pour suivre l'inclinaison du tube pendant le cintrage. Le tube s'engage juste dans la gorge du galet cintreur qui, par ses joues, s'oppose à l'élargissement, et par suite à l'aplatissement de la section (voir fig. VII-8).

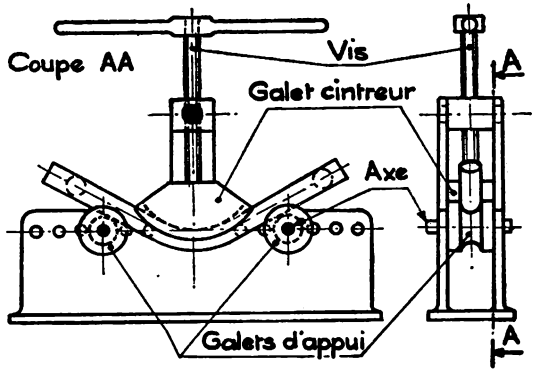



Fig. VII-13. — Machine à cintrer par pression (à vis).

Pour chaque diamètre, il y a un galet cintreur avec un rayon de cintrage qui ne peut pas varier et qui est de l'ordre de 3 à 4 fois le diamètre du tube (fig. VII-14). L'écartement des galets d'appui augmente également avec le diamètre. Des trous, repérés, sont prévus à cet effet dans le bâti (fig. VII-15).

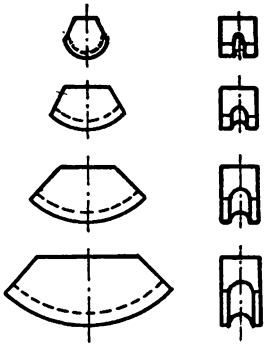


Fig. VII-14.
Série de galets cintreurs.

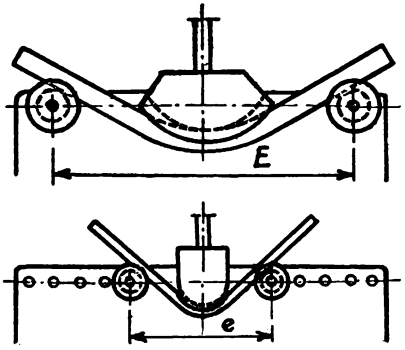



Fig. VII-15. — Écartement (*E* et *e*) variable avec le diamètre du tube.

Pour obtenir un coude à une longueur donnée *L*, d'une extrémité, on situe l'axe du sabot de cintrage, à une distance *a* (voir fig. VII-10): *a* = 10 mm pour le 12-17, 15 mm pour le 15-21, 20 mm pour le

20-27, 25 mm pour le 26-34, 30 mm pour le 33-42, 35 mm pour le 40-49 et 40 mm pour le 50-60.

Il faut éviter de faire un coude trop fermé qu'il n'est pas possible d'ouvrir sur la machine. Dans tous les cas, l'ouverture est difficile à exécuter sans déformations, surtout sur tubes galvanisés que l'on ne peut pas chauffer.

PRESSES A CINTRER. — En atelier, on utilise des presses hydrauliques — et plus rarement, à vis — du même principe que les machines ci-dessus. Les formes d'appui sont articulées et jumelées, et elles accompagnent le tube durant tout le cintrage (fig. VII-16). Ces presses sont, soit horizontales, soit verticales, et elles peuvent également servir pour le dressage des tubes (et des profilés).

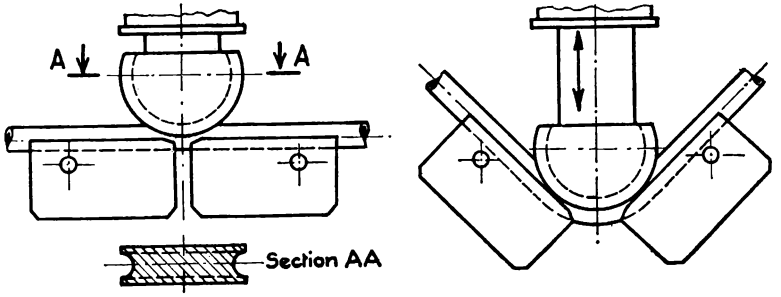



Fig. VII-16. — Presse à cintrer.

Il faut un galet cintreur pour chaque diamètre de tube et pour chaque rayon de cintrage, mais on peut obtenir des angles différents, en faisant varier la course du galet cintreur. Pour tubes de moyenne et forte épaisseur et rayons normaux.

*Cintrage sur galets à gorge.* — Même principe que les cintreuses à tôle (type pyramidal). Les trois galets ont une gorge au diamètre extérieur du tube (fig. VII-17), et ils sont tous moteurs, le plus souvent. Le rayon de cintrage varie avec la descente du galet central. On peut faire sur ces machines, des cercles complets et des serpentins en utilisant un galet de guidage (mêmes machines que pour le cintrage des profilés fig. VI-21). Les galets peuvent être horizontaux ou verticaux. Pour grands rayons de cintrage sur grandes longueurs en tubes moyens et épais.

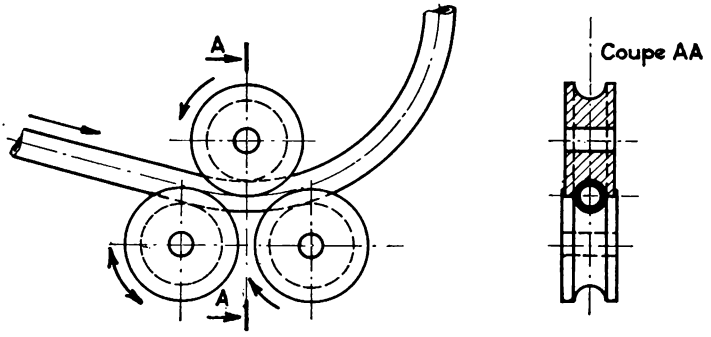



Fig. VII-17. — Schéma d'une cintreuse à galets.

***Cintrage par enroulement et compression.*** — Une forme de cintrage *fixe A*, porte l'empreinte du tube (fig. VII-18). Un galet *B*, ou un patin *C*, entraîné par un bras pivotant *D*, enroule le tube sur la forme *A*. Le tube est constamment maintenu extérieurement — à l'endroit où il est en cours de cintrage — entre la forme et le galet (voir la coupe de la figure VII-18).

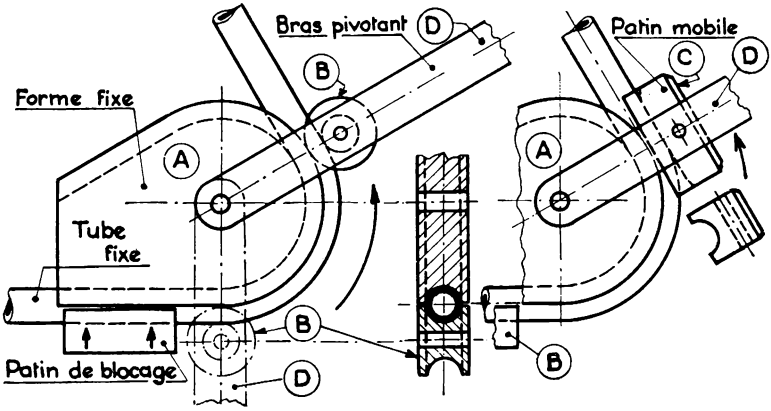



Fig. VII-18. — Cintrage par enroulement et compression. Principe.

Avec cette méthode, il y a prédominance de la compression, et la ligne neutre se situe vers le tiers extérieur du tube; pour tubes petits et moyens.

***Cintrage par enroulement et étirage.*** — Dans ce cas, la forme *A* (fig. VII-19), portant une gorge au profil du tube, et au rayon de cintrage, est *articulée* autour du centre *O*. Sur cette forme, le tube est bloqué énergiquement par une mâchoire de serrage *B*. Un patin coulissant *C*, accompagne le tube durant tout le cintrage. Parfois, le

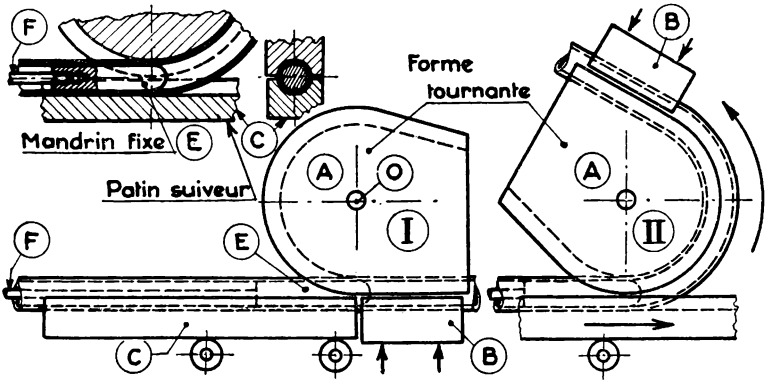



Fig. VII-19. — Cintrage par enroulement et étirage. Principe.

patin est remplacé par deux galets d'appui (fig. VII-21). Avant le cintrage, on introduit à l'intérieur du tube, un mandrin (ou souris) *E*, bien graissé, et maintenu fixe par une barre *F*, fixée sur le bâti de la machine.

Le tube se trouve maintenu extérieurement entre la forme et le patin, et intérieurement, par le mandrin — à l'endroit où le cintrage se produit — ce qui évite toute déformation de la section. En tournant, la forme *A* enroule le tube dans sa gorge extérieure.

Pour les tubes très minces et les faibles rayons, on utilise des mandrins articulés et des contre-sabots (fig. VII-20) qui s'opposent à la

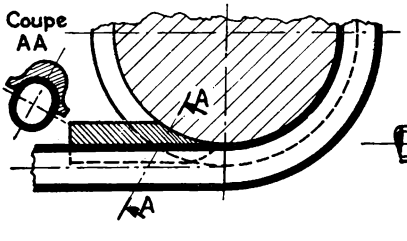



Fig. VII-20.

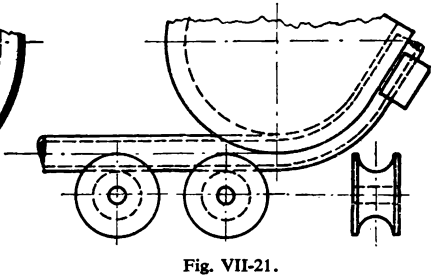


Fig. VII-21.

formation de plis, par refoulement, à l'avant du coude. Dans ce mode de cintrage, il y a plus d'étirage que de refoulement.

Ces machines sont les plus répandues, surtout pour les tubes minces. Équipées d'une commande hydraulique entièrement automatique, elles sont d'un haut rendement.

## ASSEMBLAGES

**Par éléments filetés.** — Pour tubes gaz, et pour diamètres jusqu'à 2 à 3″. Installations à basse pression (jusqu'à 10 bar) : eau, gaz, chauffage central, air comprimé, constructions métalliques, mécano-soudure, etc.

***Filetage des tubes.*** — Filet anglais, système Withworth à pas fin, dit « pas du gaz » (fig. VII-22). Le pas est exprimé par le nombre de filets au pouce : 1″ = 25,4 mm (voir tableau VII-4). Tous les filetages femelles sont cylindriques et généralement exécutés en usine (raccords); les filetages mâles sont coniques (fig. VII-23). L'étanchéité est assurée — avec un pâte à joints — par le blocage sur les filets coniques mâles. Un filetage bien fait doit se bloquer à la main, à trois ou quatre filets du fond de filetage (fig. VII-24) et il faut forcer avec une clé, pour visser à fond.

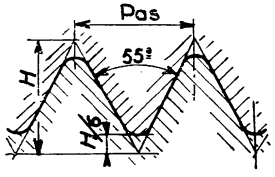



Fig. VII-22.

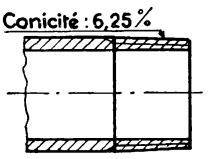



Fig. VII-23.

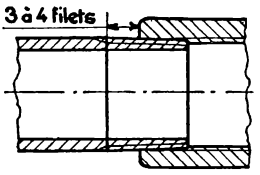



Fig. VII-24.

Pas américain : Briggs (NPT). Angle des filets : 60°. Conicité 6,25 % sur filetages mâle et femelle. Le pas est donné par le nombre de filets au pouce.

**Outillage.** — Les tubes sont serrés dans des *étaux à tubes* (fig. VII-25) montés en bout d'un établi ou sur un établi mobile pour le travail sur chantier.

Ces étaux ont 2 mors en forme de V taillés en escalier (fig. VII-26). Le mors supérieur serré par une vis passe entre les 2 mors inférieurs ce qui permet de serrer des tubes de diamètres très différents. La

tête de l'étau peut basculer pour engager ou dégager rapidement le tube sous l'étau (fig. VII-25).

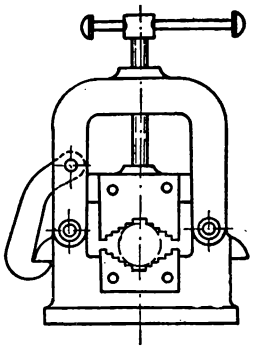


Fig. VII-25. — Étau à tube.

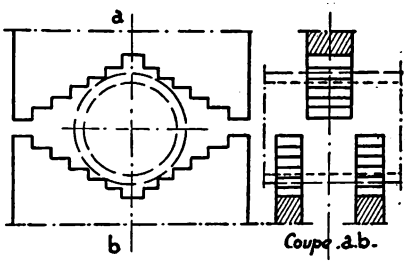



Fig. VII-26. — Mors d'étau à tube.

Pour visser les tubes et les raccords on se sert de clés spéciales dont les types les plus courants sont : *a)* la clé — genre clé anglaise — dans laquelle les 2 mors sont taillés en dents de scie en sens inverse (fig. VII-27) pour éviter le glissement ; de plus, la tête est articulée autour du point O, et ce léger déplacement possible tend à resserrer les mors sur le tube, et d'autant plus énergiquement que la pression sur la poignée est plus élevée ; *b)* la clé à chaîne utilisée surtout pour les gros tubes.

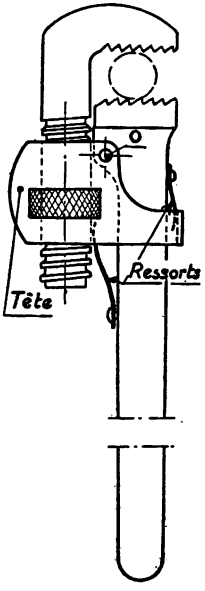



Fig. VII-27.
Clé pour serrer les tubes.

***Filières à tubes.*** — Il existe des filières construites comme des filières ordinaires, complétées par un système de guidage pour centrer le tube. Certains modèles permettent de fileter plusieurs diamètres (filières ajustables) par le montage de peignes différents, facilement interchangeables, et taillés au pas correspondant au diamètre du tube. Des filières à tête peu encombrante, et à cages interchangeables (une cage par ⌀ de tube), sont très pratiques pour le travail sur chantier.

Dans toutes les filières, on peut fileter, soit à

droite, soit à gauche, par simple changement des peignes ou de la cage, et la plupart des filières sont à cliquet, ce qui permet de travailler sur place, dans un angle, et dans la position où l'effort est le moins pénible.

A l'atelier, on utilise de véritables machines-outils, dans lesquelles les filets sont taillés par des fraises.

Pour tous les filetages, une bonne huile de coupe est indispensable.

## Raccords filetés.

Il existe une très grande variété de raccords filetés dont les principaux sont : les manchons qui peuvent être filetés en totalité à droite

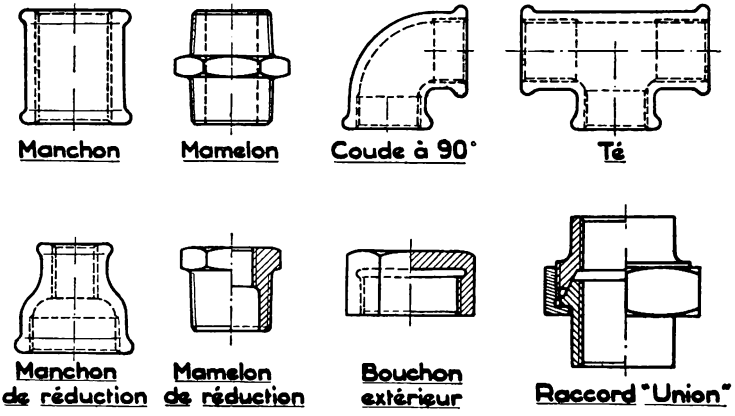



Fig. VII-28. — Raccords filetés.

ou par moitié à droite et à gauche, les mamelons, les coudes à rayon normal ou à grand rayon, les tés, les croix, les bouchons, les manchons et les mamelons de réductions, etc. (fig. VII-28). De très nombreuses combinaisons sont possibles en utilisant des raccords avec filetages intérieur et extérieur et des réductions.

Pour le démontage des tuyauteries, sans les tourner ni les déplacer, on emploie des manchons droite et gauche — qui exigent néanmoins l'écartement des 2 tubes de la longueur du manchon — les raccords

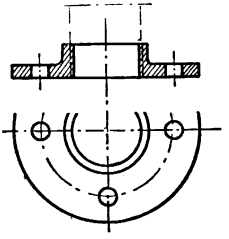


Fig. VII-29. — Bride filetée.

« Union » ou raccords 3 pièces (fig. VII-28) et les brides filetées (fig. VII-29).

Pour assurer l'étanchéité d'un joint fileté, on met dans les filets, du chanvre avec une pâte à joint : suif pour l'eau froide, blanc de zinc, huile de lin, mastics divers du commerce dont certains sont à base de graphite pour les fluides chauds.

*Exécution d'un joint fileté.* — Le chanvre — en petite quantité — est enroulé, les brins bien écartés, sur toute la longueur des filets et *dans le sens du filetage* (fig. VII-30). Puis, on enduit le chanvre, avec une pâte à joints et on visse le raccord. L'excès de chanvre est refoulé et lissé en forme de congé après blocage.

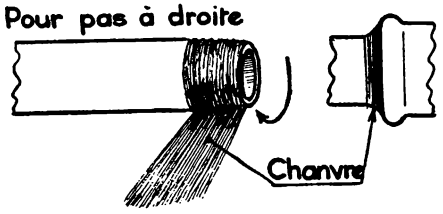



Fig. VII-30. — Joint au chanvre.

**Assemblages par soudage.** — Par soudage au chalumeau, à l'arc surtout (moyennes et hautes pressions) et par soudo-brasage (basses pressions).

*Soudage au chalumeau.* — Les 2 bords découpés et *ébavurés à l'intérieur* sont pointés, puis soudés, toujours en montant. Chaque fois que le tube transporte un fluide, on doit éviter les gouttes de traversé à l'intérieur qui réduiraient la section. On compense par un cordon extérieur plus important (fig. VII-33) obtenu facilement par la méthode demi-montante (fig. VII-31) en roulant le tube pendant le soudage.

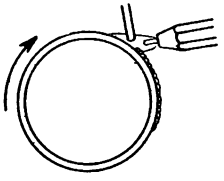


Fig. VII-31.

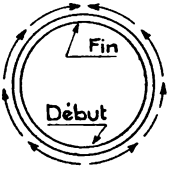



Fig. VII-32.

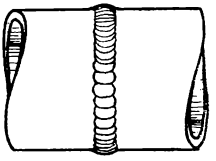


Fig. VII-33.

Si le tube ne peut pas être tourné, ni déplacé, on soude en partant du point le plus bas suivant 2 demi-circonférences (fig. VII-32).

*Soudo-brasage.* — S'exécute dans les mêmes conditions que le soudage, mais exige un décapage parfait des bords à réunir après chanfreinage.

*Soudage à l'arc.* — (Électrode enrobée, sous flux gazeux, semi-automatique). Il faut attacher beaucoup d'importance à la préparation et à la présentation correcte des extrémités. Si le tube ne peut pas être tourné, on peut souder, soit en montant, soit en descendant suivant le diamètre du tube et surtout suivant le type d'électrode utilisé.

***Raccords soudables.*** — Ces raccords ont l'avantage de supprimer les filetages et le cintrage (sauf pour les grands rayons de cintrage).

COURBES. — Fabriquées en usine, elles sont livrées aux angles de 30°, 60°, 45°, 90° et 180° et à trois rayons de cintrage : 2 *d* (peu employé), 3 *d* et 5 *d* (fig. VII-34). En coupant ces courbes à l'angle voulu, on peut obtenir toutes les formes désirées (fig. VII-36).

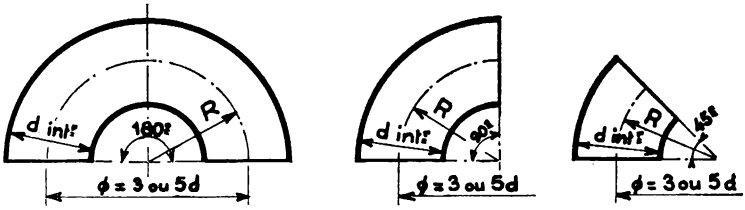



Fig. VII-34. — Courbes pour tubes.

RÉDUCTIONS. — Changements de diamètres. Peuvent être concentriques ou excentriques (fig. VII-35). Il existe également des *tés* égaux et des tés de réduction, pour les piquages d'équerre. A défaut de tés préparés, on ajuste le piquage à la demande, et on soude.

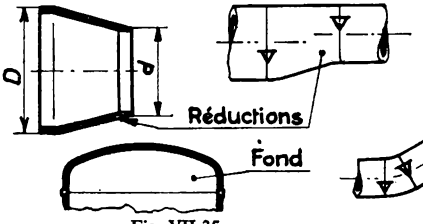



Fig. VII-35.

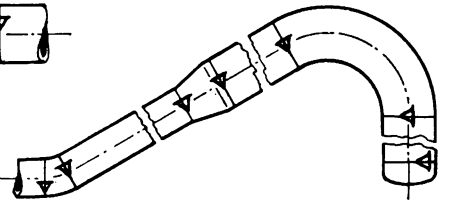


Fig. VII-36.

Raccords soudables.

FONDS DE TUBES (en américain : Caps). — Utilisés pour fermer les tubes à leur extrémité (fig. VII-35).

Tous ces raccords ont l'inconvénient de ne pas être démontables; aussi on prévoit, de place en place, un assemblage démontable par brides.

*Tubes série « pétrole »* conformes aux normes américaines (ASA). Tubes sans soudure, définis par leur ∅ nominal en pouces et par leur épaisseur. Celle-ci augmente avec le ∅ nominal, et pour un même ∅, elle peut varier : dans ce cas, elle est repérée par un chiffre dit *n° de Schedule.*

Ex. : Tube 10", Schedule 80.

***Assemblages par brides soudées.*** — Quelquefois vissées. Assemblage démontable le plus utilisé pour les tubes sans soudure, de moyens et gros diamètres, et pour moyennes et hautes pressions.

Les brides sont définies par : *a)* leur *type* ; *b)* par le ∅ *nominal du tube*, en millimètres (parfois en pouces) dans les normes françaises (NF), et en pouces dans les normes américaines (ASA) ; *c)* la *pression d'utilisation* ou *pression nominale* : PN (1) en bar (NF) et en livres par pouce carré : psi (2) ou Lb ou # (ASA) ; *d)* la forme *de la portée de joint.*

***Principaux types de brides.*** — BRIDES PLATES A SOUDER (fig. VII-37-I), NF-E 29-282 et 283.

Pour ∅ nominal de 10 à 1 000. PN 10 et PN 16.

Soudures exécutées comme figure VII-37-I.

Brides ASA : Ce sont les brides *Slip-on* (SO). Dans ce même type, il existe aussi les brides à emboîtement (fig. VII-39) dites *Socket welding* (SW).

BRIDE LIBRE SUR COLLET PLAT SOUDÉ (fig. VII-37-II) NF-E 29-294. — On dit aussi bride flottante ou tournante; pour ∅ nominal de 52 à 500. La bride porte un chanfrein pour le passage du cordon de soudure du collet. Ces brides suppriment le positionnement angulaire des trous.

Ce modèle n'existe pas dans les normes ASA. Par contre, on y trouve les brides à collet battu (fig. VII-40) *Lap-joint* (LJ).

On peut monter ensemble deux brides plates à souder, ou deux brides libres sur collet, ou encore, comme sur la figure VII-37, une bride plate à souder et une bride libre sur collet.

(1) Séries courantes NF : PN16 – PN25 – PN40 – PN64.
Séries courantes ASA : 150 # – 300 # – 400 # – 600 # – 900 # – 1 500 # – 2 500 #.
(2) 1 psi = 0,0689 bar, soit ≈ 0,07 bar – Ex. : 300 # ≈ 20 bar.

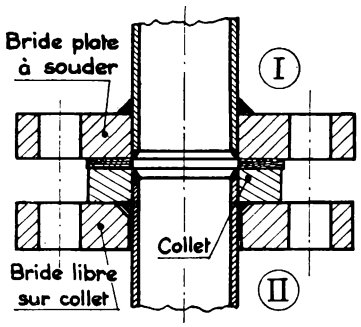



Fig. VII-37.

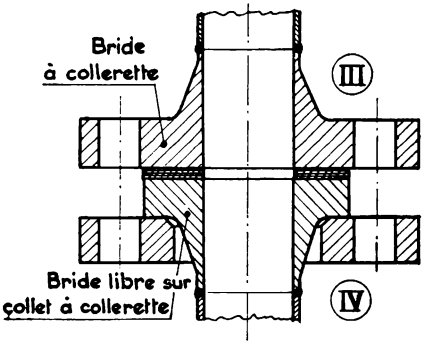



Fig. VII-38.

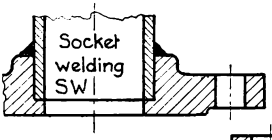



Fig. VII-39

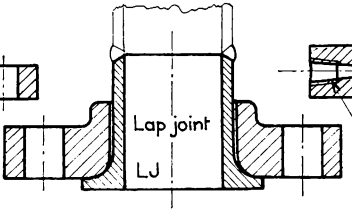



Fig. VII-40

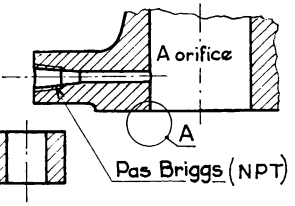



Fig. VII-41.

BRIDE A COLLERETTE A SOUDER EN BOUT (fig. VII-38-III). — NF-E 29-284 pour PN 16, 29-285 pour PN 25, 29-286 pour PN 40, 29-287 pour PN 64, ∅ nominal jusqu'à 1 000. Ces brides appelées couramment « brides pétrole » sont plus coûteuses que les brides plates; elles ont l'avantage de supprimer les soudures d'angle et *d'éviter les déformations du plan de joint*, par le retrait. Pour moyennes et hautes pressions. Ce sont les plus utilisées.

Brides ASA : *Welding neck* (WN).

BRIDE LIBRE SUR COLLET A COLLERETTE SOUDÉ (fig. VII-38-IV). — Pour PN 16, NF-E 29-296; ∅ nominal jusqu'à 500.

Mêmes avantages que les brides à collerette ci-dessus; de plus, elles évitent le positionnement angulaire des trous.

Il existe d'autres types de brides (voir catalogue des fabricants et normes des brides) : les brides ovales lyonnaises, les brides ovales vissées à collet, les brides rondes vissées (voir fig. VII-29), à collet, les brides rondes libres sur collet battu (comme fig. VII-48-II), etc.

On peut signaler aussi dans les normes ASA, les brides pleines *(Blind)* pour obturer une extrémité de conduite, et les brides à orifice (fig. VII-41) qui permettent de monter un manomètre, une prise d'échantillon, etc.

*Désignation* : Soit à désigner une bride à collerette soudée, sur un tube de ∅ ext 114 mm, et d'épaisseur 6 mm, pour une pression d'utilisation de 40 bar, avec portée de joint surélevée.

NF : Bride à collerette, ∅ nominal 100, PN 40, portée de joint surélevée;

ASA : Bride WN, 4″, Schedule 40, série 600 #, RF.

***Étanchéité.*** — Entre les brides, on interpose un joint qui, par déformations élastiques ou plastiques, pénètre dans les irrégularités de surface, assurant ainsi l'étanchéité.

MATÉRIAUX UTILISÉS. — Caoutchouc armé : fluides froids; cuir : huile; fibre : eau chaude; amiante ou produits à base d'amiante : fluides très chauds.

Les joints en matières plastiques (élastomères) qui résistent très bien aux corrosions, aux produits pétroliers, etc., mais à des températures de l'ordre de 100 °C (certains jusqu'à 200 °C) : caoutchoucs synthétiques, produits complexes désignés commercialement par : Nylon, Téflon, Gaflon, etc.

Tous ces joints peuvent être découpés par l'utilisateur dans des feuilles, ou livrés tout découpés à la forme par le fabricant.

On utilise aussi des joints métalliques en cuivre, aluminium, inoxydables, pour hautes pressions et hautes températures. Les joints métallo-plastiques, constitués d'une feuille d'amiante sertie entre deux feuilles minces de cuivre, ou d'inoxydable (pour hautes températures).

***Portées de joints normalisées*** (NF-E 29-021).

*Portées planes* (fig. VII-42) ASA : *Flat face* (FF)

*Portées planes surélevées* (fig. VII-43) ASA : *Raised face* (RF)

Sur ces deux types de portées, on usine souvent des gorges. La figure VII-46, donne les formes et dimensions des gorges ASA.

*Portées avec emboîtement simple* (fig. VII-44) qui maintiennent le joint du rond, et l'empêchent de tomber au démontage.

2 modèles ASA : *a)* Emboîtement simple large : *Large male* (LM) et *large female* (LF); *b)* Emboîtement simple étroit : *Small male* (SM) et *small female* (SF).

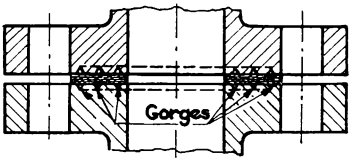



Fig. VII-42.

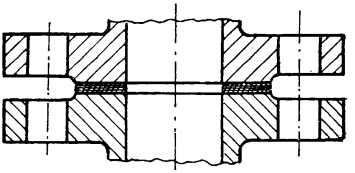


Fig. VII-43.

*Portées avec emboîtement double* (fig. VII-45). Pour joints de faible largeur, immobilisés par leurs ⌀ int. et ext. et parfois collés.

2 modèles ASA : Emboîtement double large : *Large tongue and groove* (LTG) et emboîtement double étroit : *Small tongue and groove* (STG).

*Face à joint annulaire* : Sur les deux portées, planes ou surélevées, est usinée une gorge de forme trapézoïdale, dans laquelle se loge *un joint métallique* annulaire de section octogonale ou oblongue, dite ovale (fig. VII-47).

ASA : *Ring type joint* (RTJ).

L'écrasement du joint — surtout oblong — donne une étanchéité parfaite. Pour les fortes pressions et hautes températures sur brides plates ou à collerette.

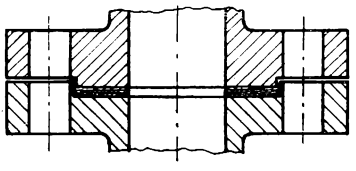


Fig. VII-44.

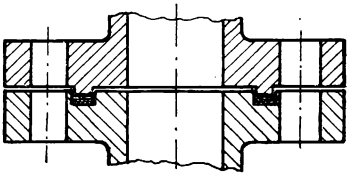


Fig. VII-45.

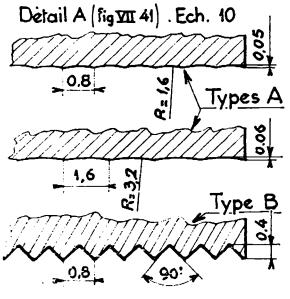



Fig. VII-46.
Détail A sur Fig. VII-41.

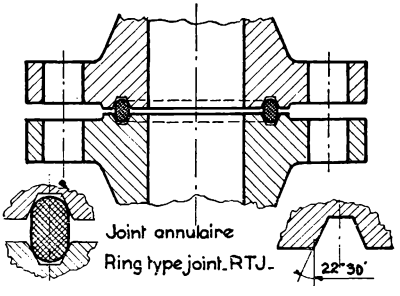



Fig. VII-47.

## TUBES EN ACIER INOXYDABLE

Ces tubes peuvent être sans soudure, ou soudés, sous argon, ou en haute fréquence. Qualité : austénitiques surtout, pour les industries chimiques, et ferritiques pour la décoration.

On les désigne par leur ⌀ ext. et leur épaisseur ; exemple : tube 50 × 1,5.

**Travail des tubes inox.** Ils se travaillent sensiblement comme les tubes acier, *avec plus de soin* pour ne pas rayer le métal et pour éviter les inclusions de particules d'acier ordinaire, qui amorceraient des corrosions ultérieures.

L'oxy-coupage n'est pas applicable et il est remplacé par le coupage à la poudre ou au plasma.

On peut utiliser les mêmes méthodes de cintrage que pour les aciers ordinaires, à la main, et à la machine. La faible épaisseur, relative, des tubes inox, oblige souvent à cintrer sur machine à mandrin intérieur (voir fig. VII-19) et pour les grands rayons ou les serpentins, on préfère les machines à trois galets (voir fig. VII-17).

Mais souvent, on supprime le cintrage en intercalant des courbes soudées en inoxydable.

**Assemblages.** — Presque uniquement par soudage : soudage à l'arc (faibles corrosions) et soudage à l'argon (corrosions sévères). Comme pour l'acier, on utilise des éléments, en inoxydable, fabriqués en usine : courbes de 3 *d* et 5 *d*, à 90° (voir fig. VII-34) dont les diamètres et épaisseurs correspondent aux dimensions des tubes. On emploie également des réductions (voir fig. VII-35) et des collets emboutis à souder (fig. VII-48-II) pour certaines brides.

Les liaisons démontables se font surtout par brides.

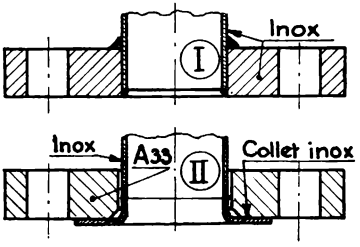



Fig. VII-48.

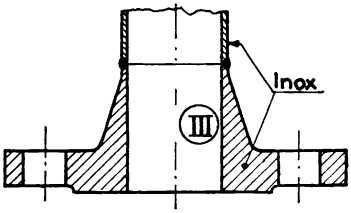



Fig. VII-49.

*Brides plates en inoxydable* (fig. VII-48-I). — Bonne solution, mais coûteuse.

*Bride inox à collerette* (fig. VII-49). — Solution excellente mais très coûteuse (pour hautes pressions).

*Bride libre en acier non allié, sur collet embouti à souder* (fig. VII-48-II). — Solution plus économique.

Dans toutes les tuyauteries en inoxydable, les fluides transportés étant oxydants, ou corrosifs, aucune pièce en acier non allié, ne doit être en contact avec le fluide, ou avec la surface du joint.

Les joints sont en matières plastiques : Nylon, Gaflon, etc. (voir p. 342).

**Tubes cuivre.** — Ces tubes, fabriqués par extrusion, sont recherchés pour leurs propriétés chimiques et thermiques, et ils remplacent de plus en plus les tubes acier et plomb, dans les installations sanitaires.

On ne rencontre pratiquement que des tubes sans soudure dont les diamètres varient pour les petites sections de millimètre en millimètre, et l'épaisseur de 1/4 en 1/4 de millimètre.

***Cintrage à froid.*** — Pour tous les cintrages, on recuit *juste la longueur à cintrer.*

A VIDE, on procède comme pour l'acier. Pour les petits diamètres, on cintre *sur ressort à boudin* (fig. VII-50). — On introduit dans le tube, au droit du coude, un ressort à boudin bien graissé. Ce ressort est terminé par un axe avec goupille qui permet de le tourner à l'aide d'une broche à baïonnette manœuvrée par un vilebrequin. Pendant le cintrage le ressort s'oppose à l'ovalisation du tube. Pour sortir le ressort, en tournant dans le sens convenable, on roule les spires, ce qui diminue son diamètre.

On utilise de la même façon les ressorts extérieurs au tube pour les petits diamètres.

A LA RÉSINE. — On remplit de résine qu'on laisse solidifier, en comblant par remplissages successifs, la retassure qui est très importante.

Sur un marbre à cintrer ou sur un montage quelconque on dispose des tasseaux en bois qui portent l'empreinte du tube (fig. VII-51). Celui-ci se cintre à l'endroit où il porte sur le tasseau. En déplaçant le tube régulièrement on cintre sur toute la longueur du coude.

A défaut de marbre on cintre entre 2 pièces de bois dans lesquelles on ménage une série d'encoches qui correspondent aux différents diamètres.

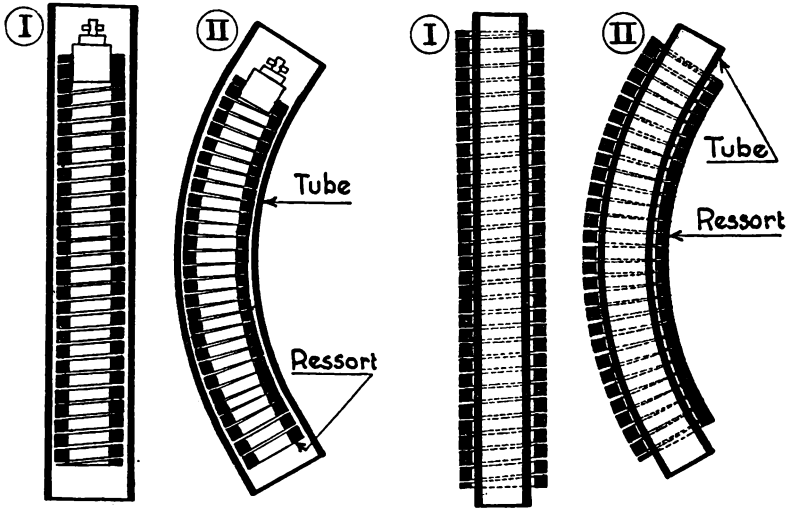



Fig. VII-50. — Cintrage sur ressort intérieur et extérieur.

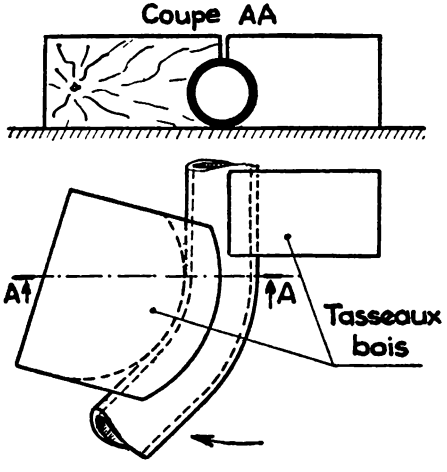



Fig. VII-51. — Cintrage d'un tube cuivre.

La résine s'oppose à l'écrasement du tube ; mais il se forme souvent, à l'intérieur du coude, des plis que l'on plane sur la résine dès qu'ils apparaissent.

Lorsque le rayon de cintrage est faible il est parfois nécessaire de vider le tube une ou plusieurs fois pour recuire la zone cintrée ; puis on remplit à nouveau pour le cintrage suivant.

***Cintrage à chaud.*** — Comme pour le tube d'acier on remplit de sablon *bien tassé* et on chauffe vers 800 °C. Il est plus difficile de localiser le chauffage en raison de la bonne conductibilité du cuivre et on chauffe au chalumeau pour les petits diamètres. Les butées sont en bois de préférence, pour ne pas marquer.

***Cintrage à la machine.*** — On utilise les mêmes machines que pour l'acier, et particulièrement les machines de la figure VII-19, sans mandrin intérieur pour les petits diamètres.

***Assemblages.*** — JOINTS NON DÉMONTABLES. — Le soudage par capillarité est le plus employé, avec des *brasures tendres* (au phosphore ou à l'argent). Les surfaces en contact doivent être bien préparées (jeu faible et régulier) et parfaitement décapées et fluxées. Après un préchauffage convenable, la baguette fond au contact de la pièce (voir brasage, p. 272), et la brasure, très fluide, coule parfaitement entre les deux pièces à réunir.

Pour le raboutage de deux tubes, on procède comme l'indiquent les figures VII-52 à VII-54, et on trouve, dans le commerce, des coudes et des tés, en cuivre embouti ou en laiton matricé, avec des emboîtages tout préparés (fig. VII-55).

Avec de la *soudure à l'étain*, on procède de la même façon, à plus basse température, mais le joint est nettement moins solide. Le *soudo-brasage* s'applique aux tubes épais.

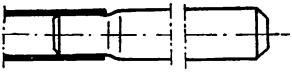


Fig. VII-52.

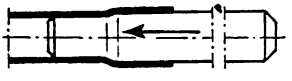


Fig. VII-53.

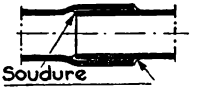



Fig. VII-54.

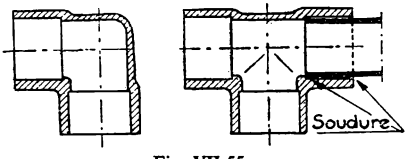



Fig. VII-55.

JOINTS DÉMONTABLES. — Dans les installations sanitaires, on utilise les *joints à collets battus* exécutés à la main (fig. VII-56), ou mieux,

à l'aide de petites machines. Les joints, mal exécutés, peuvent présenter des criques dans la carre du collet, et ils ne sont pas admis pour le gaz.

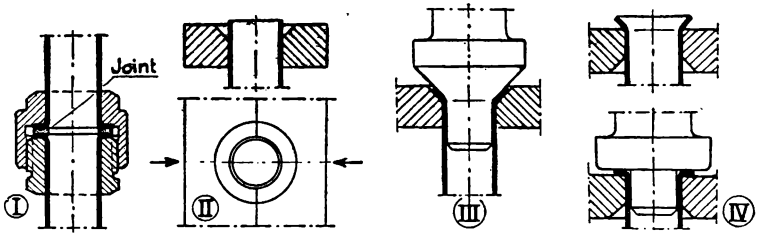



Fig. VII-56. — Joint à collets battus.

LES JOINTS BICONIQUES (fig. VII-57) ont l'avantage de se monter rapidement, sans aucune préparation des extrémités des tubes et l'étanchéité est obtenue par le sertissage des bords des bagues biconiques sur le tube (pour petits ⌀).

Pour les gros diamètres, on assemble par des *brides en acier*, qui sont brasées par capillarité, ou soudo-brasées, ou encore par brides libres sur collet battu, ou sur collet rapporté (voir fig. VII-48-II).

Les ***tubes laiton*** se travaillent comme les tubes cuivre, mais jamais à chaud.

**Tubes en alliages légers.** — Les méthodes de travail s'apparentent beaucoup à celles du travail des tubes de cuivre, *avec plus de soin* encore, en raison de leur plus faible dureté.

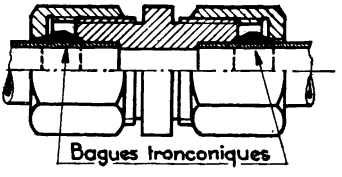



Fig. VII-57.

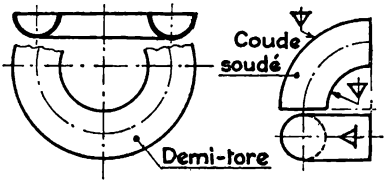



Fig. VII-58.

***Cintrage à la main.*** — A froid on peut opérer *à vide* comme pour le cuivre. Si *on remplit*, on utilise la résine ou un alliage du type « Cerrobend » qui a la composition suivante : bismuth, 50; cadmium, 10; plomb, 26,7; étain, 13,3 et qui fond à 72 °C, c'est-à-dire facilement dans l'eau très chaude.

Dans un bain-marie de grandes dimensions, on loge le récipient contenant le « Cerrobend » et on plonge les tubes pour un préchauffage. Une extrémité étant fermée avec un morceau de bois, on remplit le tube dans l'eau même et on refroidit rapidement. Pour vider il suffit de remettre le tout dans l'eau chaude.

Si le coude est de faible rayon on vide une ou plusieurs fois pour recuire ou tremper à nouveau.

Les butées en bois portent des gorges et des empreintes au diamètre du tube (fig. VII-51) et il faut prendre des précautions particulières pour éviter de marquer et de rayer le métal, surtout l'aluminium.

***Cintrage à chaud.*** — De la même façon que pour l'acier et le cuivre, on cintre au sable qu'il faut avant tout *bien tasser.* — Pour apprécier la température, on enduit le tube de suif ou de savon blanc ou plus couramment on opère comme pour les profilés (voir fig. VI-20). Les plis sont enlevés avec des marteaux polis sur des tas en bois très propres.

***Cintrage à la machine.*** — Voir tubes cuivre.

Dans tous les cintrages, on recuit la zone cintrée pour les A G (duralinox). Pour le duralumin, on travaille sur trempe fraîche, parfois sur recuit suivi d'une trempe avant la finition.

***Assemblages.*** — Les assemblages *non démontables* se font par soudage à l'argon *(TIG* ou *MIG)* ou par soudo-brasage pour le duralumin. Les courbes (fig. VII-53) sont fabriquées à partir de deux demi-tores, mis en forme par repoussage.

Les *démontables,* pour les petits diamètres, peuvent être des raccords vissés. Pour les gros diamètres, on utilise les brides : brides en alliages légers, soudo-brasées (duralumin), brides à collerette soudées en bout (comme fig. VII-49), brides libres sur collet battu, ou sur collet soudé (comme fig. VII-48-II).

**Tubes plomb.** — Le plomb épais (tuyau à eau) se cintre à vide et on évite les rayons de cintrage trop faibles.

Pour les tuyaux de vidange (plomb mince) on cintre à l'aide d'un chapelet de billes, monté sur une cordelette solide (fig. VII-59). La première bille en buis est tournée au diamètre exact du tube et les billes suiveuses ont un diamètre plus faible.

Avant cintrage, le tube est calibré et dressé par le passage d'un mandrin en bois bien suiffé (I). On cintre ensuite légèrement à l'endroit choisi, ce qui a pour effet d'ovaliser le tube (II).

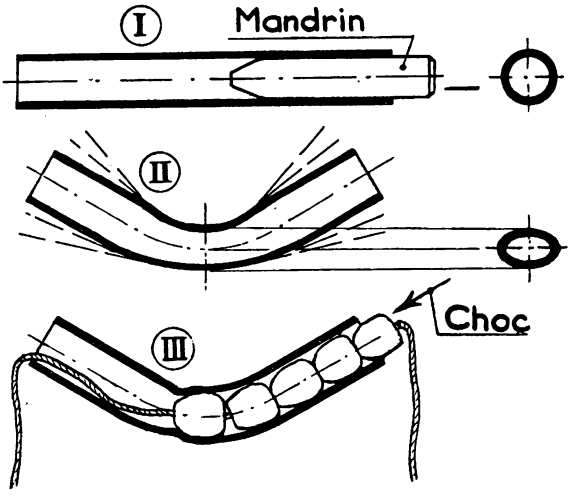



Fig. VII-59. — Cintrage d'un tuyau de plomb.

Les billes sont introduites les unes après les autres, et on les oblige à passer dans le coude en frappant avec un maillet (III) ou en utilisant un mandrin en bois lorsque le coude n'est pas tout près d'une extrémité du tuyau.

Très progressivement on diminue le rayon de cintrage en passant les billes à chaque nouvelle réduction de l'angle du coude (II).

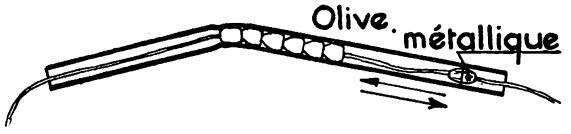



Fig. VII-60.

Si le coude est loin des extrémités du tube (fig. VII-60) on utilise une olive métallique qui joue le rôle d'un mouton en frappant sur les billes par les tractions alternées exercées sur la corde. L'olive qui est en 2 pièces ne peut pas glisser ; elle est maintenue par un nœud logé à l'intérieur.

IMPRIMERIE BARNÉOUD S. A., LAVAL, N° 6293 — 9-1971.
DÉPÔT LÉGAL : 4e TRIMESTRE 1971, N° 7225.
*Imprimé en France*

G. COTANT

# Traçage des métaux en feuilles

**Lycées techniques, collèges d'enseignement technique**
**Cours professionnels. Préparation aux C.A.P. et B.P.**

216 pages, 623 figures. *2e édition.* N.T. Broché **17,50** F

R. LAVAL

# Manuel du traceur chaudronnier tôlier

**Lycées techniques,**
**Collèges d'enseignement technique**
**Cours professionnels**

168 pages, 231 figures. *1re édition.* N.T. Broché **12,10** F

***Ouvrages inscrits sur la liste des manuels adoptés par les écoles de la Ville de Paris.***

**DUNOD** ÉDITEUR, 92, RUE BONAPARTE - PARIS-6e - 326-99-15